



**Naturalis**

Repositorio Institucional  
<http://naturalis.fcnym.unlp.edu.ar>

Universidad Nacional de La Plata  
Facultad de Ciencias Naturales y Museo



# **Evaluación de la eficiencia en remoción de nitrato de un humedal construido a escala de laboratorio**

**Núñez, María del Rosario**

Magister en Ecohidrología

Dirección: Vallester, Erick

Co-dirección: Mariñelarena, Alejandro

Facultad de Ciencias Naturales y Museo  
2017

Acceso en:

<http://naturalis.fcnym.unlp.edu.ar/id/20190527001664>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional



**Naturalis**

Repositorio Institucional  
FCNyM - UNLP



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MUSEO**

Tesis de Maestría en Evaluación Ambiental de Sistemas  
Hidrológicos

Para la obtención del Título de  
**Magíster en Evaluación de Sistemas Hidrológicos**  
(Mención Ecohidología)

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN  
REMOCIÓN DE NITRATO EN UN HUMEDAL  
CONSTRUIDO A ESCALA DE LABORATORIO**

Autor: Licda. María del Rosario Núñez

Director de Tesis: M.Sc. Erick Vallester

Co-director de Tesis: Dr. Alejandro Mariñelarena

Lic. Hugo Di Giorgi

**La Plata, Junio 2017**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MUSEO**

**Tesis de Maestría en Evaluación Ambiental de Sistemas  
Hidrológicos**

**Para la obtención del Título de**  
**Magister en Evaluación de Sistemas Hidrológicos**  
**(Mención Ecohidrología)**

***EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN REMOCIÓN  
DE NITRATO EN UN HUMEDAL CONSTRUIDO A  
ESCALA DE LABORATORIO***

Autor: Licda. María Del Rosario Núñez

Director de Tesis: M.Sc. Erick Vallester

Co-director de Tesis: Dr. Alejandro Mariñelarena

Lic. Hugo Di Giorgi

La Plata, Junio 2017

*A Dios, Padre de la Misericordia  
por darme la fuerza para poder terminar este proyecto.  
“Oh sangre y agua que brotaste del Sagrado Corazón de Jesús  
Como una Fuente de Misericordia para nosotros,  
yo confié en ti”*

## ***AGRADECIMENTOS***

Primeramente, doy gracias a Dios por la fortaleza que me brindó durante el desarrollo de la Maestría.

Quiero expresar mi eterna gratitud a mi madre y mis familiares por el apoyo incondicional y por toda la paciencia que han tenido durante estos años.

Agradezco a mis profesores guía, Ing. Erick Vallester, Dr. Alejandro Mariñelarena y el Lic. Hugo Di Giorgi, por sus atinadas asesorías y por todo su apoyo en las gestiones realizadas durante el desarrollo de la tesis.

Doy un especial agradecimiento a mis amigas Yuly y Majo por todo el cariño familiar que me brindaron mientras realizaba mis estudios en Argentina.

Quiero agradecer también a mis amigos, compañeros y profesores del departamento de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Nacional de la Plata, especialmente al profesor Pablo Romanazzi.

Mi eterno agradecimiento a la SENACYT y al IFARHU por la confianza puesta en mí al financiar beca para realizar los estudios de maestría.

Finalmente, deseo manifestar mi sincero agradecimiento a las autoridades de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de Panamá, por el respaldo brindado durante el desarrollo de la tesis, por el espacio brindado para realizar las pruebas experimentales del modelo en los laboratorios de hidráulica y Sanitaria.

***Muchas Gracias!***

## ***I RESUMEN***

La contaminación de las fuentes de agua para abastecimiento humano con nitratos provenientes de la mala disposición de residuos orgánicos sólidos y líquidos, es un problema creciente de preocupación mundial. El objetivo de este trabajo fue determinar la capacidad de un humedal construido para eliminar nitratos del agua. Se utilizó un prototipo de humedal construido de flujo vertical ascendente, de 350 litros de capacidad, por el que se hizo circular agua con  $60 \text{ mgNO}_3/\text{L}$ , con y sin suplemento de metanol como fuente de carbono. El experimento se realizó en tres etapas. La etapa 0 (caudal  $4.2 \text{ L/hr}$ , TRH 24 hs, sin metanol); etapa 1 (caudal  $6.6 \text{ L/hr}$ , TRH 15 hs con metanol) y etapa 2 (caudal  $10.8 \text{ L/hr}$ , TRH 9 hs con metanol). Las eficiencias de remoción de nitratos fueron del 6%, 91% y 92% en cada etapa. La fuente de carbono suplementaria fue un factor decisivo para incrementar la capacidad de desnitrificación del sistema. Entre la etapa 1 y la 2 se incrementó un 64% el caudal y por ende, la tasa de carga de nitratos. En cada una se verificó una remoción de  $85,7$  y  $140,6 \text{ gNO}_3/\text{m}^3\cdot\text{día}$  o  $14,8$  y  $24,3 \text{ gNO}_3/\text{m}^2\cdot\text{día}$  respectivamente. No se determinó la tasa máxima de eliminación pero se estima muy por encima de lo reportado. Se concluye que esta tecnología puede ser una herramienta práctica y económica para mejorar la calidad del agua contaminada con nitratos.

## ***ABSTRACT***

Pollution of water sources for human supply with nitrates from poor disposal of solid and liquid organic waste, is a growing problem of global concern. The aim of this study was to determine the ability of a constructed wetland to remove nitrates from water. A prototype constructed wetland vertical upward flow of 350 liters, through which water was circulated  $60 \text{ mgNO}_3 / \text{L}$ , with and without supplemental methanol as carbon source was used. The experiment was conducted in three stages. Stage 0 (flow rate  $4.2 \text{ L / hr}$ , TRH 24 hours, no methanol); Stage 1 (flow rate  $6.6 \text{ L / hr}$ , TRH 15 hours with methanol) and Stage 2 (flow rate  $10.8 \text{ L / hr}$ , TRH 9 am with methanol). The nitrate removal efficiencies were 6%, 91% and 92% at each stage. The additional carbon source was a decisive increase the capacity factor denitrification system. Between stage 1 and the 2nd 64% increased flow rate and thus the rate of load of nitrates. In each case a removal of  $85.7$  and  $140.6 \text{ gNO}_3 / \text{m}^3.\text{día}$  or  $14.8$  and  $24.3 \text{ gNO}_3 / \text{m}^2.\text{día}$  verified respectively. The maximum rate of elimination was not determined but is estimated well above those reported. It is concluded that this technology can be a practical and economical tool for improving the quality of water contaminated with nitrates.

## ***II TABLA DE CONTENIDO***

|          |                                                                              |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUCCIÓN .....</b>                                                    | <b>13</b> |
| 1.1      | Antecedentes.....                                                            | 13        |
| 1.2      | Hipótesis.....                                                               | 15        |
| 1.3      | Objetivos .....                                                              | 15        |
| 1.4      | Marco Teórico .....                                                          | 16        |
| 1.4.1    | Las Aguas Residuales .....                                                   | 16        |
| 1.4.2    | Aguas residuales domesticas .....                                            | 16        |
| 1.5      | Saneamiento de Aguas Residuales en Panamá.....                               | 16        |
| 1.6      | Nitrato en el ciclo del Nitrógeno .....                                      | 21        |
| 1.7      | Tratamiento de Aguas residuales.....                                         | 25        |
| 1.7.1    | Sistemas de tratamiento existentes para remoción de nitrato.....             | 26        |
| 1.8      | Humedales .....                                                              | 27        |
| 1.8.1    | Los humedales construidos como unidad de tratamiento .....                   | 28        |
| 1.8.2    | Humedales Construidos .....                                                  | 29        |
| 1.8.3    | Clasificación de los humedales construidos.....                              | 30        |
| 1.9      | Clasificación de humedales construidos de flujo subsuperficial vertical..... | 33        |
| 1.9.1    | Humedal con carga vertical descendente .....                                 | 33        |
| 1.9.2    | Humedal con carga vertical ascendente .....                                  | 34        |
| 1.9.3    | Generalidades del Diseño de los Humedales .....                              | 36        |
| 1.10     | Mecanismos de remoción de contaminantes en Humedales construidos .....       | 37        |
| 1.10.1   | Remoción de sólidos suspendidos .....                                        | 38        |
| 1.10.2   | Remoción de materia orgánica .....                                           | 38        |
| 1.10.3   | Remoción de fósforo.....                                                     | 38        |
| 1.10.4   | Remoción de bacterias .....                                                  | 38        |
| 1.11     | Remoción del Nitrógeno .....                                                 | 39        |
| 1.12     | Condiciones de Operación de los Humedales .....                              | 41        |
| <b>2</b> | <b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>                                            | <b>43</b> |
| 2.1      | Descripción del Modelo experimental .....                                    | 43        |
| 2.2      | Calculo de volumen y tiempo de retención hidráulica (TRH) .....              | 49        |
| 2.3      | Alimentación del Sistema.....                                                | 49        |
| 2.3.1    | Etapas de Evaluación del sistema .....                                       | 50        |



|          |                                                                                                                   |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4      | Muestreo y análisis .....                                                                                         | 52        |
| 2.5      | Tratamiento de los datos .....                                                                                    | 58        |
| <b>3</b> | <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>                                                                               | <b>59</b> |
| 3.1      | Nitrato .....                                                                                                     | 59        |
| 3.2      | Temperatura.....                                                                                                  | 63        |
| 3.3      | Conductividad Eléctrica .....                                                                                     | 64        |
| 3.4      | pH.....                                                                                                           | 65        |
| 3.5      | Potencial Redox .....                                                                                             | 66        |
| 3.6      | Demanda Química de Oxígeno (DQO).....                                                                             | 67        |
| 3.7      | Demanda Biológica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ).....                                                             | 69        |
| 3.8      | Oxígeno Disuelto y Cloro Residual .....                                                                           | 71        |
| 3.9      | Fosfato.....                                                                                                      | 72        |
| 3.10     | Remoción de Nitratos .....                                                                                        | 73        |
| 3.11     | Resultado del análisis bromatológico de raíces de enea “ <i>typha angustifolia</i> ” ..                           | 77        |
| 3.12     | Resultado de la prueba T-Student para muestras relacionadas .....                                                 | 79        |
| 3.12.1   | Análisis de la media de las entradas y salidas del humedal en las tres etapas de Estudio, .....                   | 79        |
| 3.12.2   | Resultados Análisis de la media de la salida del humedal en la etapa 0 y Etapa 1 (Sin metanol, Con Metanol) ..... | 81        |
| 3.13     | Discusión comparativa de resultados.....                                                                          | 82        |
| 3.14     | Ventajas y Limitaciones del sistema de humedal contruidos de flujo vertical ascendente.....                       | 85        |
| 3.15     | Factibilidad de aplicación en el campo de la Ecohidrologia .....                                                  | 86        |
| <b>4</b> | <b>CONCLUSIONES .....</b>                                                                                         | <b>88</b> |
| <b>5</b> | <b>RECOMENDACIONES.....</b>                                                                                       | <b>91</b> |
| <b>6</b> | <b>RECONOCIMIENTOS.....</b>                                                                                       | <b>92</b> |
| <b>7</b> | <b>BIBLIOGRAFÍA CITADA .....</b>                                                                                  | <b>93</b> |
| <b>8</b> | <b>ANEXO .....</b>                                                                                                | <b>98</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1-1. Cobertura de Saneamiento a Nivel Nacional.....                                                               | 17 |
| Tabla 1-2. Niveles de toxicidad del Nitrato en agua para infantes menores de 6 años ..                                  | 23 |
| Tabla 1-3. Parámetros típicos de diseño para humedales contruidos para tratamiento de aguas residuales domesticas ..... | 36 |
| Tabla 1-4. Mecanismos de depuración predominantes en los humedales artificiales. ...                                    | 37 |
| Tabla 2-1. Estratigrafia del humedal construido de Flujo Vertical Ascendente.....                                       | 45 |
| Tabla 2-2. Composición del agua residual sintética .....                                                                | 49 |
| Tabla 2-3. Parámetros analizados .....                                                                                  | 53 |
| Tabla 2-4. Parámetros analizados en Prueba de Bromatología .....                                                        | 57 |
| Tabla 3-1. Operación del Humedal construido a escala de Laboratorio .....                                               | 59 |
| Tabla 3-2. Análisis de Estadística descriptiva de las concentraciones de Nitrato (NO <sub>3</sub> )                     | 59 |
| Tabla 3-3. Valores promedios de temperatura registrados durante la etapa de investigación.....                          | 63 |
| Tabla 3-4. Valores promedios de la Conductividad Eléctrica registrados durante la investigación.....                    | 64 |
| Tabla 3-5. Valores promedios de pH registrados durante la etapa de investigación .....                                  | 65 |
| Tabla 3-6. Valores promedios de Potencial Redox registrados durante la etapa de investigación.....                      | 66 |
| Tabla 3-7. Características de humedales según el Potencial Redox .....                                                  | 66 |
| Tabla 3-8. Valores promedios de DQO registrados durante la etapa de investigación ..                                    | 67 |
| Tabla 3-9. Capacidad de remoción de DBO <sub>5</sub> en el humedal construido durante la investigación.....             | 69 |
| Tabla 3-10. Valores promedios de Fosfato registrados durante la etapa de investigación .....                            | 72 |
| Tabla 3-11. Condiciones operativas y consumo de nitratos en cada etapa de estudio. ...                                  | 73 |
| Tabla 3-12. Resultado del análisis de la tasa de remoción en las etapas de estudio .....                                | 74 |
| Tabla 3-13. Resultado del análisis bromatológico de raíces de la planta Typha angustifolia .....                        | 78 |
| Tabla 3-14. Prueba de Normalidad de los valores obtenidos durante las pruebas experimentales .....                      | 79 |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3-15. Prueba de muestras relacionadas.....                                   | 80 |
| Tabla 3-16. Estadísticos de muestras relacionadas .....                            | 81 |
| Tabla 3-17. Correlación de muestras relacionadas .....                             | 81 |
| Tabla 3-18. Prueba de muestras relacionadas Sin Metanol - Con metanol.....         | 81 |
| Tabla 3-19. Compilación de estudios en humedales construidos y sus resultados..... | 83 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-1. División Política de la República de Panamá.....                                                                                                                                     | 18 |
| Figura 1-2. Mapeo de los ríos con mayor concentración de nitrato, Cuenca del Canal de Panamá. Fuente: (Stanley, 1999) .....                                                                      | 20 |
| Figura 1-3. Ciclo del Nitrógeno.....                                                                                                                                                             | 21 |
| Figura 1-4. Imagen del lago Miraflores con indicios de problemas de Eutrofización....                                                                                                            | 24 |
| Figura 1-5. Esquema general de la contaminación de los cuerpos de aguas subterránea a causa de la ganadería extensiva y al uso intenso de fertilizantes. Adaptado de Rivett et al. (2008). ..... | 24 |
| Figura 1-6 . Clasificación de los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales (adaptado de Vymazal & Kröpfelová, 2009).....                                                    | 31 |
| Figura 1-7. Configuración de Humedales de Flujo Superficial.....                                                                                                                                 | 32 |
| Figura 1-8. Configuración de Humedales de Flujo subsuperficial .....                                                                                                                             | 33 |
| Figura 1-9. Configuración de Humedales de Flujo vertical Ascendente .....                                                                                                                        | 35 |
| Figura 1-10. Modelo conceptual de funcionamiento del humedal para le remoción de Nitrato .....                                                                                                   | 35 |
| Figura 2-1. Esquema de metodología propuesta .....                                                                                                                                               | 43 |
| Figura 2-2. Esquema del modelo utilizado.....                                                                                                                                                    | 44 |
| Figura 2-3. Estratigrafía del humedal construido de Flujo Vertical Ascendente .....                                                                                                              | 46 |
| Figura 2-4. Estructuras de entrada y salida del humedal .....                                                                                                                                    | 47 |
| Figura 2-5. Vista de las Plantas Typha Angustifolia sembradas en el humedal.....                                                                                                                 | 48 |
| Figura 2-6. Estructuras de entrada y salida del humedal .....                                                                                                                                    | 50 |
| Figura 2-7. Equipos analíticos usados en la pruebas .....                                                                                                                                        | 55 |
| Figura 2-8. Análisis bromatológico de Raíces de Planta Typha Angustifolia. ....                                                                                                                  | 58 |

## ***INDICE DE GRÁFICAS***

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfica 3-1 Variación en Concentración de nitrato en el Humedal -Etapa 0.....                                       | 60 |
| Gráfica 3-2 Variación en Concentración de nitrato en el Humedal -Etapa 1.....                                       | 61 |
| Gráfica 3-3 Variación en Concentración de nitrato en el Humedal -Etapa 2.....                                       | 61 |
| Gráfica 3-4 Consumo de NO <sub>3</sub> mg/l según etapa de estudio .....                                            | 62 |
| Gráfica 3-5 Comportamiento de la Temperatura en el humedal construido durante la investigación.....                 | 63 |
| Gráfica 3-6 Comportamiento de la conductividad durante la investigación.....                                        | 64 |
| Gráfica 3-7 Comportamiento del pH en el humedal construido durante la investigación .....                           | 65 |
| Gráfica 3-8 Comportamiento del Potencial Redox durante la investigación .....                                       | 67 |
| Gráfica 3-9 Variación en Concentración de DQO en el Humedal -Etapa 0 .....                                          | 68 |
| Gráfica 3-10 Variación en Concentración de DQO en el Humedal -Etapa 1.....                                          | 68 |
| Gráfica 3-11 Variación en Concentración de DQO en el Humedal -Etapa 3.....                                          | 69 |
| Gráfica 3-12 Variación en Concentración de DBO5 en el humedal construido durante la investigación.....              | 70 |
| Gráfica 3-13 Comportamiento del Oxígeno Disuelto en la entrada del humedal construido durante la investigación..... | 71 |
| Gráfica 3-14 Variación en concentración de Fosfato en el Humedal .....                                              | 72 |
| Gráfica 3-15 Eficiencia de remoción del sistema .....                                                               | 73 |
| Gráfica 3-16 Tasa de remoción vs Concentración de Nitrato .....                                                     | 75 |
| Gráfica 3-17 Carga removida frente Carga de entrada de NO <sub>3</sub> -Etapa 1 .....                               | 76 |
| Gráfica 3-18 Carga removida frente Carga de entrada de NO <sub>3</sub> -Etapa 2.....                                | 76 |

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES

Una de las principales causas de la contaminación de los cuerpos de agua es la cantidad de nutrientes y materia orgánica que son vertidos a ellos como resultado de las diferentes actividades antrópicas. La depuración de las aguas servidas, tanto domésticas como industriales, es una condición ineludible para poder alcanzar un uso racional y sostenible de los recursos acuáticos superficiales y subterráneos, garantizar condiciones mínimas de salud para la población, y mantener la calidad y biodiversidad de la vida silvestre en los ecosistemas naturales (Mariñelarena, 2010).

Las aguas residuales domésticas y las industriales contienen diversos nutrientes potencialmente dañinos, entre los cuales podemos mencionar el fósforo y el nitrógeno, pues las actividades agrícolas e industriales han aumentado casi al doble la cantidad de estos nutrientes fijado anualmente en la biosfera (Cervantes, Pérez, & Gómez, 2000). Parte importante de este nitrógeno llega a los diferentes cuerpos de agua en la forma de amonio, nitrato y nitrito, creando problemas de toxicidad para los organismos acuáticos, además de cambios ambientales como la eutrofización de lagos.

El nitrato es una de las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas naturales, residuales y residuales tratadas, se presenta generalmente a nivel de trazas en el agua de superficie, pero puede alcanzar niveles elevados en las subterráneas (Secretaría de Economía, 2001). Un estudio físico-químico realizado en las aguas del Río Chagres entre 1997 y 2006, por el investigador Stanley Heckadon, para la Autoridad del Canal de Panamá, reveló la existencia de nitratos disueltos en las aguas de dicho recurso que es la principal fuente de provisión de agua para las ciudades de Colón y Panamá. Otros estudios han detectado concentraciones considerables de nitratos en reiteradas ocasiones, debido posiblemente al vuelco de aguas servidas provenientes del área de influencia (J, F, & Johnson, 2012).

Las fuentes de aporte de nitratos al agua incluyen fertilizantes, sistemas sépticos, efluente de tratamiento de aguas residuales, desechos animales, industriales y de procesamiento de alimentos. Es necesario, entonces, encontrar métodos para mantener la

concentración de compuestos nitrogenados dentro de niveles que no causen el deterioro de los ríos, lagos y mares.

En la actualidad, existen diferentes tipos de tratamientos con el fin de remover todo tipo de sustancias y de esta forma reducir las contaminaciones que estas pueden causar. Existen tanto métodos biológicos como fisicoquímicos que permiten remover nitratos en aguas residuales domésticas, uno de ellos son los humedales construidos los cuales hacen parte de los métodos biológicos.

Los humedales tienen un gran potencial de autodepuración debido a la interacción de la vegetación, el suelo y la flora bacteriana. Desde hace algún tiempo se aprovechan para construir sistemas que imitan la naturaleza y depuran las aguas residuales de forma respetuosa con el entorno natural y tienen menos requerimientos energéticos y una atractiva aplicabilidad por su versatilidad y rentabilidad económica; además pueden satisfacer las demandas de núcleos habitacionales asilados y pequeñas urbanizaciones, con un criterio descentralizado, evitando el incremento desmedido de las instalaciones de las grandes ciudades.

Sistemas de tratamiento a escala de laboratorio y en ambientes controlados para la remoción de nitratos han sido poco estudiados en nuestras latitudes, la bibliografía indica que la mayoría de los estudios de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales han sido desarrollados en Europa y Estados Unidos.

En esta experiencia se adoptó una concentración de nitratos de 60 mg NO<sub>3</sub>/L, un valor superior al nivel máximo de contaminante establecidos por normativas Panameñas e internacionales, 50 - 45 mgNO<sub>3</sub>/L (OMS y EPA) para demostrar que la tecnología sirve para reducir concentraciones inaceptables a aceptables. Como la desnitrificación es un proceso heterotrófico, de respiración anóxica, en el que los nitratos se utilizan como aceptor de electrones en reemplazo del oxígeno, es necesario asegurar una fuente de carbono suficiente. Para ello, durante la experiencia se adicionó metanol en el agua a tratar, con una concentración de 2,5 g cada 4,5 g de NO<sub>3</sub>.

Este proyecto busca generar información sobre la capacidad de remoción de nitrato de un humedal construido a escala de laboratorio, que permita contribuir al conocimiento de la aplicación de estos sistemas para el tratamiento de aguas con cargas contaminantes

de nutrientes y así mejorar tanto el estado ecológico de ecosistemas hídricos como las fuentes de abastecimiento.

## **1.2 HIPÓTESIS**

La hipótesis sobre la cual se sustenta este trabajo corresponde a: Un humedal construido a escala de laboratorio y sometido a diferentes cargas hidráulicas permitirá remover nitratos.

Las preguntas más significativas a responder con el desarrollo de la tesis son las siguientes:

- ¿Cuál será la tasa de remoción de nitrato durante las etapas de estudio?
- ¿El incremento del caudal influye en la tasa de remoción de nitrato?
- ¿Existen variaciones en los parámetros físicos químicos del influente al efluente durante las pruebas experimentales?

## **1.3 OBJETIVOS**

El objetivo principal de esta investigación es generar información sobre la capacidad de remoción de nitrato en un humedal construido a escala de laboratorio, sometido a diferentes cargas hidráulicas.

### **Objetivos específicos:**

- Determinar las tasas de remoción de nitrato (masa por unidad de volumen y tiempo) durante las etapas de estudio.
- Evaluar la influencia del incremento del caudal en la tasa de remoción de nitrato en el agua residual.
- Evaluar las variaciones de parámetros físicos-químicos como el pH, Conductividad y Oxígeno disuelto y su influencia sobre las tasas de remoción de nitrato.



## **1.4 MARCO TEÓRICO**

### **1.4.1 Las Aguas Residuales**

Llamamos agua residual a los líquidos procedentes de la actividad humana, que llevan en su composición elementos contaminantes y que generalmente son vertidos a cursos o a masas de aguas continentales o marinas. (Calvo, 1999) .

Las aguas residuales son responsables del 80% de la morbilidad en los países en vía de desarrollo; esta situación se encuentra estrechamente relacionada con las bajas coberturas en el sistema de alcantarillado y el inadecuado tratamiento y disposición final de las aguas residuales (Otálora, 2011).

### **1.4.2 Aguas residuales domesticas**

Las aguas residuales domesticas están conformadas por los efluentes de inodoros, bidets, lavatorios, bañeras, piletas de cocina, piletas de lavar, desagote de lavarropas, etc. Estos líquidos contienen una gran variedad de contaminantes, que por su estructura física (partículas, coloides, solutos) y química (grasas, aceites, jabones, proteínas, materia orgánica compleja), presentan diversas dificultades para su eliminación. En función de sus características físicas y químicas y de la estrategia utilizada para su eliminación, los contaminantes suelen agruparse en las siguientes categorías (Mariñelarena, 2010):

- Sólidos Sedimentables (SS).
- Carga orgánica (DQO – DBO)
- Nutrientes (N y P)
- Organismos patógenos (Bacterias, virus, parásitos intestinales)
- Metales pesados
- Orgánicos persistentes
- Otros

## **1.5 SANEAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN PANAMÁ**

En materia de saneamiento, Panamá cuenta con una cobertura de 94,5% a nivel nacional, estando 33,1% de la población conectada a alcantarillado, 30.0% a tanque

séptico<sup>1</sup>, 31,4% a letrinas<sup>2</sup> y 5,5% sin servicio sanitario (Silva, 2015), lo que significa que 49.179 hogares no hay siquiera un lugar fijo para destinar las excretas fisiológicas, por lo que utilizan el monte, las quebradas o el mar es la opción utilizada (tabla 1-1).

*Tabla 1-1. Cobertura de Saneamiento a Nivel Nacional*

| <b>Tipo de Servicio</b>  | <b>Hogares servidos</b> | <b>% de cobertura</b> |
|--------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Alcantarillado Sanitario | 296.704                 | 33,1                  |
| Tanque Séptico           | 268.704                 | 30,0                  |
| Letrina                  | 281.463                 | 31,4                  |
| No tiene                 | 49.179                  | 5,5                   |

Fuente: Censo Poblacional 2010

La situación del tratamiento de las aguas residuales en el país es preocupante, toda vez que la mayoría de las zonas urbanas e industriales descargan sus efluentes directamente en los sistemas de alcantarillados, lo cual podrá atenderse con mayor eficiencia, contando con recursos provenientes de una nueva estructura tarifaria (Silva, 2015).

Sobre el porcentaje de aguas residuales que reciben tratamiento a nivel nacional no existe un estimativo preciso, aunque algunas ciudades, como David, Santiago, Chitré y Las Tablas, poseen lagunas de estabilización que tratan una porción significativa de las aguas residuales.

---

<sup>1</sup> Una letrina es un mecanismo de deposición informal conformado por un pozo poco profundo (<2 m) y una caseta donde se coloca una plataforma o loza y el retrete por donde se evacuan las excretas.

<sup>2</sup> Un tanque séptico, (es lo mismo que una cámara séptica), consiste en un recipiente estanco de concreto, mampostería o plástico por donde circulan las aguas residuales y se retienen los sólidos flotantes y sedimentables provenientes de los inodoros y cocinas. Generalmente los tanques sépticos se complementan con otros sistemas como zanja de infiltración y un pozo ciego.



*Figura 1-1. División Política de la República de Panamá*

De acuerdo al Plan Nacional para la Gestión Integrada De Los Recursos Hídricos Panamá, 2008-2012, el servicio de alcantarillado atiende a 1.988.493 habitantes del país mediante 20 sistemas de alcantarillado sanitario y 1.130 km de tuberías. La red de alcantarillado del área metropolitana tiene una longitud aproximada de 650 km. El 70,3% (1.398.473 habitantes) de las aguas residuales reciben tratamiento, a través de lagunas de oxidación, tanques sépticos y tanques Inhoff (IDAAN, 2008). Existe un déficit de sistemas de tratamiento y los que existen no son adecuados tecnológicamente (Silva, 2015).

Por medio del área de Protección de la Calidad Ambiental, del Ministerio de Ambiente, se llevó a cabo la toma de muestras de agua de las principales cuencas hidrográficas de Panamá con el objetivo de determinar y verificar el índice de la calidad de agua de la región.

Estos monitoreos se realizan dos veces al año, uno en la temporada seca y otro en la temporada lluviosa, los que también son utilizados para definir la línea base que se viene estudiando de las principales cuencas hidrográficas del país desde el año 2002 hasta la fecha, para conocer la calidad de agua en ambas temporadas, donde se toman parámetros de calidad física como la temperatura, PH (contenido de ácido o no ácido del agua) y oxígeno disuelto, igualmente se toman muestras para determinar hallazgos de coliformes, nutrientes y demanda biológica de oxígeno.

Los resultados obtenidos establecen que el 89% de los ríos monitoreados en el país presentan calidad de aguas aceptables y aguas poco contaminadas, el 11% restante poseen aguas contaminadas. Se destaca que el 98% de los ríos del interior del país presentan calidad de aguas aceptables y aguas poco contaminadas. El 53% de los ríos monitoreados y localizados en la provincia de Panamá, poseen aguas contaminadas o de mala calidad (Autoridad Nacional del Ambiente, 2014).

En cuanto a la presencia de nutrientes los cuales son elementos químicos y compuestos que existen en la naturaleza y son utilizados por los organismos vivos para mantener sus propios procesos vitales, se han llevado a cabo estudios físico- químicos realizados entre 1997 y 2006 por el investigador Stanley Heckadon para la Autoridad del Canal de Panamá, en los que se analizaron entre otros elementos, la presencia de nutrientes de nitrógeno (nitratos, nitritos y amonio) y de fósforo (fosfatos).

Para establecer la tendencia en la concentración de nitratos a través del tiempo, se compararon los resultados obtenidos por el Programa de Monitoreo de los Recursos Naturales de la Cuenca del Canal de Panamá de 1997 a 1998 en 14 sitios cercanos a los estudiados en 1975 por la Comisión del Canal de Panamá. En 1975 las concentraciones de nitratos variaron entre 0,010 a 0,114 mg/l, presentándose las mayores concentraciones en los ríos Chilibre, cerca de Gamboa y Gatuncillo (Stanley, 1999). Actualmente, se ha detectado que las concentraciones de nitratos son más altas que en 1975, para todos los 14 sitios comparados, con rangos que varían entre 0,63 y 3,01 mg/l siendo las principales causas de este aumento la constante y rápida expansión de la población e industrias y, por tanto, de los volúmenes de agua servidas (Stanley, 1999). En la Figura 1-2 se muestra un mapeo de los ríos con mayor concentración de Nitratos encontrados en el mencionado estudio.



## 1.6 NITRATO EN EL CICLO DEL NITRÓGENO

El Nitrógeno es un nutriente esencial para el crecimiento de todos los seres vivos. Las formas de interés en las aguas residuales son las de nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitrógeno en forma de nitritos y nitratos.

Mediante la aplicación de tratamientos biológicos para la remoción de nitrato, se obtiene como producto final  $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2$ , gases que son devueltos a la atmósfera (Cervantes, Pérez, & Gómez, 2000). La remoción biológica se basa en el ciclo biogeoquímico del nitrógeno, el que está compuesto por diversos procesos naturales mediados por microorganismos, que mantienen un constante equilibrio entre las distintas formas de nitrógeno.



Figura 1-3. Ciclo del Nitrógeno. Fuente: Romero, 2002

Como se observa en el ciclo del nitrógeno (Figura 1-3), la forma predominante en aguas residuales domésticas frescas es el nitrógeno orgánico; las bacterias rápidamente descomponen el nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal y, si el medio es aerobio, lo

oxidan a nitritos y nitratos. El predominio de nitratos indica que el residuo se ha estabilizado con respecto a su demanda de oxígeno (Marín Montoya & Correa Ramírez, 2010).

El Nitrato se encuentra de forma natural en el agua y el suelo pero en pequeñas concentraciones, porque el aporte natural es escaso y se consume rápidamente. La presencia de nitratos en las aguas utilizadas para suministro público, es debida a la contaminación de las fuentes de aguas naturales con compuestos nitrogenados.

El deterioro de la calidad del agua a causa de la contaminación por nitratos, es un problema de extensión mundial y de gran interés por sus repercusiones tanto en la salud humana como en el ecosistema (Abdirashid, Madramootoo, Egeh, Liu, & Hamel, 2002). La descomposición de residuos orgánicos sólidos (basura) y líquidos (cloacas), transforma grandes cantidades de nitrógeno orgánico en nitratos. El ión nitrato es altamente móvil. Es soluble en agua y al presentar carga negativa al igual que los coloides del suelo, no es fijado por éste. Por lo tanto, lo que no es absorbido por las plantas queda libre para ser arrastrado por el agua mediante percolación profunda o escorrentía, causando la contaminación de aguas subterráneas y superficiales respectivamente (Waskom, 1994).

La necesidad de remoción de este elemento obedece, a que el nitrato es utilizado por las algas y otros organismos acuáticos como nutriente, produciendo un crecimiento desmedido que altera el equilibrio ecohidrológico del ecosistema. En cuanto a la salud pública, en los intestinos humanos, el nitrato es reducido a nitrito, el cual es absorbido por el torrente sanguíneo y causa la meta hemoglobinemia infantil (hemoglobina modificada “oxidada” incapaz de fijar el oxígeno el cual provoca limitaciones de su transporte en los tejidos) o de la formación de nitrosaminas, las cuales son cancerígenas (Marín Montoya & Correa Ramírez, 2010).

Los niveles de toxicidad con nitrato varían dependiendo de su concentración en el agua que es ingerida por los infantes (Tabla 1-2). También se ha reportado que el nitrato es un riesgo potencial para las mujeres embarazadas (Manassaram et al., 2010).

*Tabla 1-2. Niveles de toxicidad del Nitrato en agua para infantes menores de 6 años*

| <b>Concentraciones (mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L)</b> | <b>Riesgos a la salud</b>                          |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| < 26                                                     | Efectos despreciables a la salud                   |
| 26 – 44                                                  | Riesgos insignificante                             |
| 44 – 89                                                  | Ligero riesgo crónico en algunos bebés             |
| 89 – 177                                                 | Posible riesgo crónico en algunos bebés            |
| > 177                                                    | Incremento de riesgo agudo a la salud de los bebes |

Fuente: (Schoeman & Steyn, 2003).

Debido a los riesgos para la salud que genera la ingesta de agua con nitrato, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido valores límites a la concentración de este Ion en el agua potable de 50 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L (Chambon, Lund, Gala-Gorchev, & Ohanian, 1998). Del mismo modo, la Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos ha establecido para el agua potable una concentración máxima de 44,43 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L (USEPA, 2006).

En tanto, por los problemas de concentración de nitrato de las aguas subterráneas desde los años 90, causada por la actividad agrícola, la Unión Europea promulgó la directiva (91/676/EEC) (Ongley, 1997). En Panamá adopto la concentración de 44,43 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L de acuerdo a lo establecido en el Reglamento Técnico DGNTI-COPANIC 23-395-99. AGUA. Agua Potable (DGNTI, 1999).

A nivel mundial la disponibilidad de agua ha disminuido en cantidad y calidad. Esto es causado por el aumento de la población y la contaminación de las fuentes de aguas. Se puede hablar de dos tipos principales de fuentes de contaminación de las aguas naturales por compuestos nitrogenados: la contaminación puntual y la dispersa. El primer caso se asocia a actividades de origen industrial, ganadero o urbano (vertido de residuos industriales, de aguas residuales urbanas o de efluentes orgánicos de las explotaciones ganaderas; lixiviación de vertederos, etc.) mientras que en el caso de la contaminación dispersa o difundida, la agricultura intensiva y los altos índices de aplicación de fertilizantes es la causa principal.



Si bien las fuentes de contaminación puntual pueden ejercer un gran impacto sobre las aguas superficiales o sobre localizaciones concretas de las aguas subterráneas, las prácticas de abono con fertilizantes (orgánicos o inorgánicos) son generalmente las causantes de la contaminación generalizada de las aguas subterráneas. (Rivett, Buss, Morgan, Smith, & Bemment, 2008).



Figura 1-4. Imagen del lago Miraflores con indicios de problemas de Eutrofización.

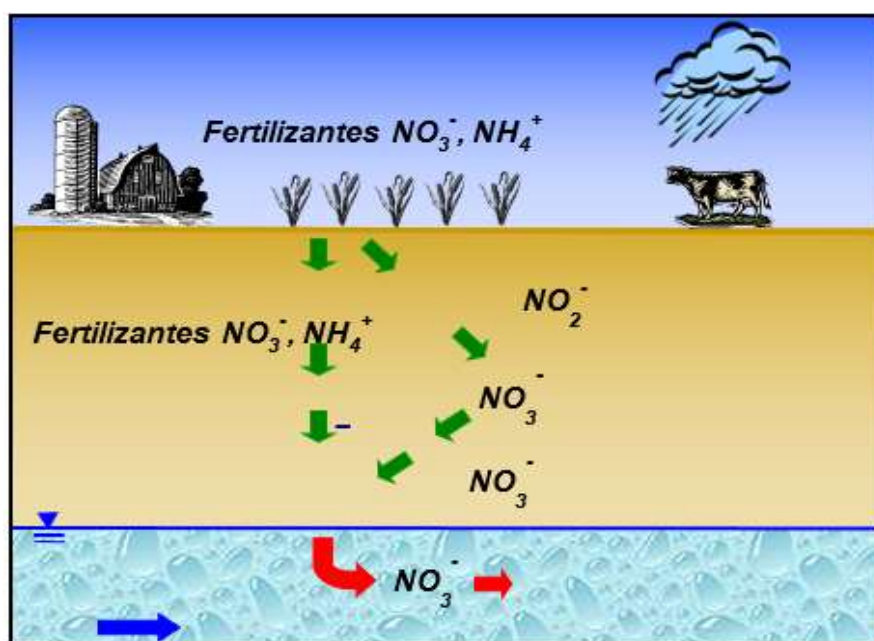


Figura 1-5. Esquema general de la contaminación de los cuerpos de aguas subterránea a causa de la ganadería extensiva y al uso intenso de fertilizantes. Adaptado de Rivett et al. (2008).

## 1.7 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Para el tratamiento de las aguas residuales existen diversos procesos y operaciones unitarias, que con una adecuada selección y combinación, pueden resolver la mayoría de las necesidades de disposición final o reaprovechamiento de los vertimientos. En términos generales existen procesos fisicoquímicos y procesos biológicos. Los procesos fisicoquímicos hacen uso de las diferencias en ciertas propiedades entre el contaminante y el agua (sedimentación y flotación) o mediante la adición de reactivos empleados para variar la forma del contaminante buscando condiciones de separación del líquido. Los procesos biológicos utilizan microorganismos que se alimentan de la materia orgánica contaminante y con ello la eliminan del agua en forma de nuevas células o de gases (Crites & Tchobanoglous, 1998).

Los pasos básicos para el tratamiento convencional de aguas residuales incluyen:

- **Pretratamiento:** Es el proceso de eliminación de los constituyentes de las aguas residuales cuya presencia puede provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos y operaciones. El desbaste y la dilaceración son procesos utilizados para la eliminación de sólidos gruesos, la flotación para eliminar grasas y aceites y el desarenado para la eliminación de la materia en suspensión gruesa (J. Romero, 1999).
- **Tratamiento primario:** Se refiere comúnmente a la remoción parcial de sólidos suspendidos y materia orgánica particulada mediante sedimentación o flotación, constituyendo una estrategia de preparar el agua residual para el tratamiento biológico. Por lo general el tratamiento primario en un sistema convencional, remueve alrededor del 60% de los sólidos suspendidos del agua residual cruda y hasta un 40% de la DBO<sub>5</sub>, fundamentalmente particulada (J. Romero, 1999).
- **Tratamiento secundario:** remoción de carga orgánica. Es un proceso biológico (oxidación o fermentación enzimática), llevado a cabo por una comunidad de microorganismos, principalmente por bacterias (Mariñelarena, 2010). Se incluyen en estos los procesos biológicos de lodos activados, filtros percoladores, sistemas de lagunaje y los humedales artificiales o construidos, además de otras opciones anaeróbicas o mixtas (J. Romero, 1999).

- Tratamiento terciario y avanzado: Supone generalmente, la necesidad de remover nutrientes (nitrógeno y fósforo) para prevenir la eutrofización de fuentes receptoras (J. Romero, 1999). Nitrógeno: Es un proceso biológico (nitrificación - desnitrificación) llevado a cabo por varios grupos de bacterias. Fósforo: Es un proceso físico - químico de complejación –sedimentación (Mariñelarena, 2010).
- Desinfección: remoción de organismos patógenos. Los métodos más usados son el agregado de cloro gaseoso o de hipoclorito de sodio (Mariñelarena, 2010).

En estos tratamientos, la diversidad de procesos descripta, la variedad y concentración de microorganismos y la necesidad de lograr determinadas condiciones de reacción, requiere el desarrollo de estructuras y dispositivos complejos para proveer sustrato donde fijarse a los organismos, fuerza motriz de mezcla, aporte de oxígeno, corrección de pH, etc., lo que implica instalaciones costosas, altos consumos de energía y de aditivos químicos y una operación por personal altamente capacitado para que el proceso funcione correctamente (Mariñelarena, 2010).

Se han desarrollado e implementado muchas tecnologías para el tratamiento de agua las cuales utilizan agentes químicos y biológicos en el proceso. De esta forma se distinguen dos grupos grandes de tratamiento de aguas, los fisicoquímicos y los biológicos.

Los procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales, pueden ser de dos tipos, convencionales y naturales, la diferencia entre ellos radica en la forma de como obtiene la energía para el proceso, por una parte, los primeros necesitan fuentes de energía externas como lo son la aireación forzada o la mezcla mecánica, mientras que los segundos, aunque necesitan de la misma energía para degradar cada kilogramo de contaminante, obtienen la energía de la naturaleza, por ejemplo aprovechan la fuerza de la gravedad, la energía del sol, del viento y la energía potencial del suelo. (Knight & Kadlec, 1996). Por esta razón el tratamiento de agua residual mediante humedales es atractivo, ya que se genera un ahorro en los costos de mantenimiento.

### **1.7.1 Sistemas de tratamiento existentes para remoción de nitrato**

Para alcanzar los niveles de concentración de nitrato que cumplan con las normas de calidad de agua, existen tecnologías probadas en el mercado para la remoción de

nitrato, tales como osmosis inversa e intercambio iónico (Kapoor & Viraraghavan, 1997). La osmosis inversa consiste en la remoción de las sustancias presentes en el agua aplicando un sistema de membranas semipermeables, en donde se hacen pasar de una condición de alta concentración a una de baja concentración. En pequeñas localidades la osmosis inversa presenta limitaciones dado que el 25% del afluente se convierte en salmuera que requiere post-tratamiento; además, necesita una presión de operación de 2.070 a 10.350 kPa (Kapoor & Viraraghavan, 1997).

El intercambio iónico, como su nombre lo indica, es el intercambio de un Ion por otro. El agua que contiene nitrato pasa a través de un medio con resina en donde ocurre el intercambio con otro Ion como cloruro o bicarbonato (Kapoor & Viraraghavan, 1997).

Tanto la osmosis inversa como el intercambio iónico, que son procesos físico-químicos usados para remover nitrato, tienen muchas limitaciones para su aplicación en muchas partes del mundo donde los recursos escasean; debido a sus altos costos, complejidad en la operación y funcionamiento. (Deago, 2014).

Además de los procesos físicos-químicos descritos, existen otros sistemas de tratamiento que aprovechan la capacidad de algunas bacterias para utilizar nitrato como aceptor de electrones en condiciones anóxicas, conocida como desnitrificación (Mateju, Cizinska, Krejci, & Janoch, 1992). Estas bacterias aprovechan el nitrato por medio de la enzima nitrato reductasa, que cataliza la reducción del nitrógeno y la liberación del oxígeno, que luego utiliza como aceptor de electrones en la respiración de compuestos orgánicos.

La desnitrificación puede realizarse con comunidades de bacterias en suspensión o adheridas (biofilm). Los sistemas más eficientes para la remoción de nitrato del agua emplean las bacterias en crecimiento adherido. Según Wanner et al. (2006), biofilm es una capa de células procariotas y eucariotas fijada a una superficie de un material de soporte, fijados en una matriz orgánica de origen biológico.

## **1.8 HUMEDALES**

El estado de arte sobre humedales muestra un sin número de definiciones de estos sistemas. El texto de la Convención Ramsar define humedales como: “las extensiones de

marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”. Dicha definición es aceptada en Panamá ya que mediante la Ley 6 de 3 de enero de 1989 se acoge la Convención Ramsar (Ramsar Regional Center for Training and Research in the Western Hemisphere, 2009).

En las últimas dos décadas, en el marco de una disciplina denominada ingeniería ecológica o ecotecnología, se han realizado investigaciones con el objetivo de aprovechar la potencialidad de estos ecosistemas para resolver distintos problemas de contaminación de las aguas y desarrollar pautas de diseño que permitan construir ecosistemas «a medida» para metabolizar los aportes provenientes de la actividad humana, evitando el deterioro de los sistemas naturales (Mariñelarena, 2008). Controlando las profundidades medias, los tiempos de residencia hidráulica, la distribución de flujos, etc., se pueden diseñar humedales poblados con vegetación autóctona y de rendimiento predecible para las condiciones climáticas de cada región. Con estos métodos se han logrado resultados notables en el tratamiento de efluentes cloacales, drenajes ácidos de minas, efluentes industriales y escurrimientos urbanos y agronómicos (Knight & Kadlec, 1996).

### **1.8.1 Los humedales construidos como unidad de tratamiento**

La necesidad de satisfacer la demanda de depuración de aguas residuales de comunidades pequeñas, no conectadas a redes cloacales centralizadas, impulsó en las últimas décadas el desarrollo de tecnologías de tratamiento más sencillas, eficientes y económicas que los métodos convencionales. Los humedales artificiales, diseñados y construidos para tratamiento de aguas servidas, resultaron ser una opción técnica y económicamente ventajosa (Mariñelarena, 2010).

Los humedales construidos, también conocidos como artificiales o de tratamiento, conforman una tecnología que reproduce y aprovecha los mecanismos físicos, químicos y biológicos de depuración del agua que ocurren en los humedales naturales, para la eliminación de contaminantes presentes en aguas residuales, (Pidre, 2010).

Los humedales construidos pueden ser considerados como ecosistemas complejos en el que los principales factores que afectan el funcionamiento son el sustrato que sirve

de soporte a la vegetación y a la población microbiana; la vegetación (macrofitas) que contribuye a la oxigenación del sustrato y a la eliminación de nutrientes; y el agua a tratar que circula a través del sustrato y la vegetación (Lara, 1999). Todo esto se junta en estructuras construidas, previamente diseñadas, para controlar la dirección del flujo, el tiempo de retención hidráulico y el nivel del agua. (EPA-832-F-00-023, 2000).

En cuanto a los rendimientos esperados, los humedales pueden reducir con efectividad altas concentraciones de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos (SS) y nitrógeno, así como niveles significativos de metales, compuestos orgánicos traza y patógenos (Lara, 1999). Los mecanismos básicos de tratamiento incluyen los procesos de sedimentación, floculación, reacciones químicas, degradación microbiana, absorción por las plantas, y volatilización (Stearman, 2003).

Los aspectos más importantes a tener en cuenta para que en la actualidad se consideren los humedales artificiales como sistemas de tratamiento de aguas son: primero, las demandas cada vez mayor de agua en un momento en el que las fuentes más económicas ya están agotadas o cerca de estarlo. Segundo, el volumen creciente de residuos biológicos y químicos que potencialmente entran en la red de aguas superficiales provenientes de las plantas de tratamiento de agua residual (Lara, 1999).

### **1.8.2 Humedales Construidos**

La construcción de humedales para el tratamiento de aguas residuales comenzó en 1946 con los trabajos de la Dra. Kathe Siedel, que en el Instituto Max Planck de Plön, Alemania propuso el modelo (MPIS) o proceso Krefeld. Este método se aplicó por primera vez en Alemania en 1974 para tratar aguas residuales municipales y aguas residuales de la industria textil, cervecera y láctea empleando plantas emergentes, convirtiéndose en una importante tecnología para el tratamiento de efluentes de tanques sépticos, de lagunas de estabilización y, en general, de efluentes de tratamiento biológico secundario (Marin & Correa, 2010).

A nivel internacional, desde 1976 se reportan en Sudáfrica, Estados Unidos y Gran Bretaña experiencias en sistemas con áreas inundadas, como pantanos y manglares naturales y a partir de 1986, se empiezan a introducir los sistemas de humedales construidos. En la actualidad este tipo de sistemas se aplica en varios países de Europa,

América, África y Australia, no solamente para tratar aguas residuales domésticas sino también para tratar efluentes con muy distintas características (Arcos, Cantellano E, Alejo M, & La, 1999). Autores como Kadlec y Knight, (1993), dan cuenta de una buena historia del empleo de humedales naturales y construidos para el tratamiento de aguas residuales.

El sistema con plantas acuáticas emergentes presenta características similares a un humedal natural. No se recomienda el uso intencional de los humedales naturales para el tratamiento de aguas residuales sin el debido monitoreo, por los efectos nocivos que tienen sobre la flora y la fauna. Por lo tanto, los estudios y las investigaciones se llevan a cabo sobre sistemas construidos y monitoreados, que mantienen las mismas características de los humedales naturales, pero pueden recibir una mayor carga del efluente en un área más pequeña (Ecocell-proyectos e consultoría ambiental, 2014).

Existe una relación estrecha entre las eficiencias de remoción y las condiciones climáticas locales. En general, los humedales construidos en climas templados y tropicales muestran mejores resultados en comparación con las experiencias llevadas a cabo en países más fríos (Pidre, 2010).

### **1.8.3 Clasificación de los humedales construidos**

En la etapa actual de desarrollo de la tecnología, dos tipos de humedales artificiales son de uso generalizado:

- Humedales de flujo superficial
- Humedales de flujo subsuperficial

Cada una de estas categorías cuenta con importantes variantes (figura 1-6) de acuerdo a la disposición, la forma de alimentación del caudal, las plantas y los patrones de flujo; siendo utilizados para tratar vertimientos domésticos, industriales, agrícolas, pecuarios, e incluso excesos de escorrentía superficial por efecto de aguas lluvias (R. H. Kadlec & Wallace, 2009).

Si bien existen algunos diseños ampliamente probados, la tecnología experimenta una permanente innovación. Una de las variables de diseño más importantes es el patrón

de flujo de agua que para esta investigación corresponde a un humedal artificial con carga vertical ascendente.

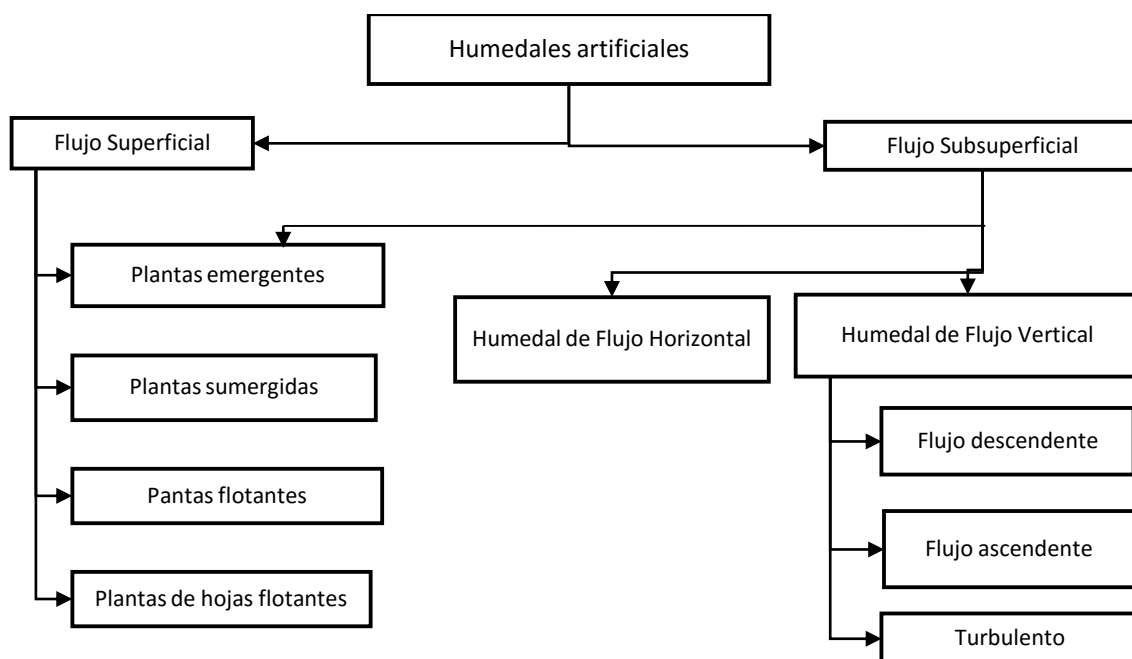


Figura 1-6. Clasificación de los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales (adaptado de Vymazal & Kröpfelová, 2009)

### Humedales de Flujo superficial

Los sistemas de flujo superficial (conocidos en inglés como *surface flow constructed wetlands* o *free water Surface constructed wetlands*) son aquellos donde el agua está expuesta a la atmósfera y circula entre los tallos de las plantas. Este tipo de humedales es una modificación del sistema de lagunas convencionales. A diferencia de éstas, tienen menor profundidad (no más de 0,6 m). Las plantas más usadas son especies de los géneros *Typha* (tatora), *Scyrpus* (junco) y *Phragmites* (caña), aunque se recomienda el uso de plantas autóctonas.

Los humedales de flujo superficial tienen menores costos de construcción pero requieren mayor superficie de terreno. Se recomiendan para tratamientos de más de 500 m<sup>3</sup>/d en zonas rurales. Se debe aplicar algún tipo de pretratamiento y/o tratamiento primario a los líquidos, antes de ingresar al humedal. Para poblaciones mayores de 500 – 1000 m<sup>3</sup>/d se utiliza un sedimentador o una laguna de estabilización como tratamiento primario.



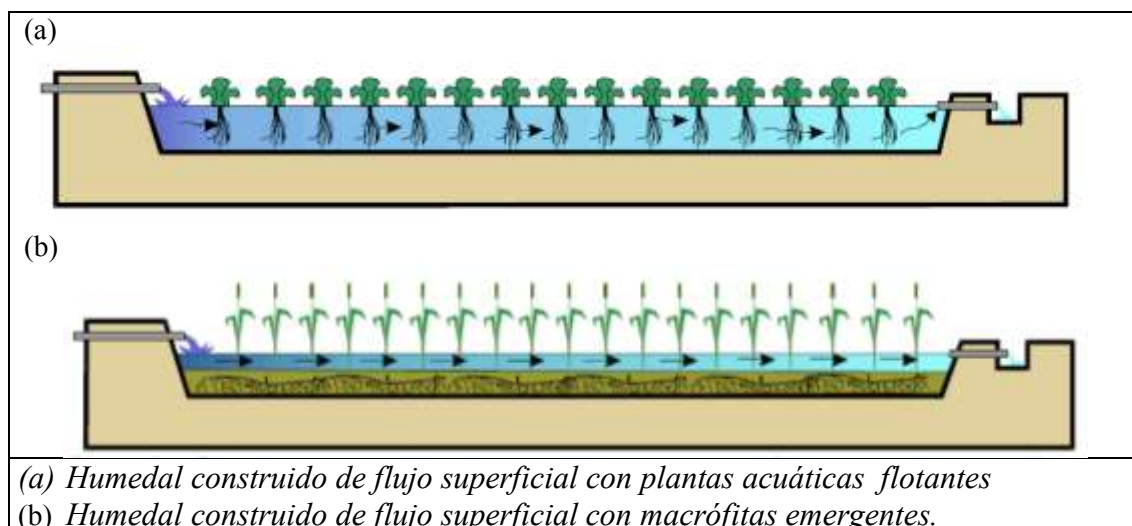


Figura 1-7. Configuración de Humedales de Flujo Superficial

### Humedales de Flujo subsuperficial

Los sistemas de flujo subsuperficial (conocidos en inglés como *subsurface flow constructed wetlands*), se caracterizan porque el agua circula a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercana a los 0,6 m. Una de las características de este sistema es que su hidráulica es influenciada por la capacidad porosa del material soporte, por esto para una mejor operación del humedal el agua residual debe tener relativamente bajas concentraciones de sólidos suspendidos y el flujo debe estar bajo condiciones uniformes (R. Kadlec & Wallace, 2009).

Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos: (a) en función de la forma de aplicación de agua al sistema: humedales de flujo subsuperficial horizontal y (b) humedales de flujo subsuperficial vertical. (EPA-832-F-00-023, 2000).

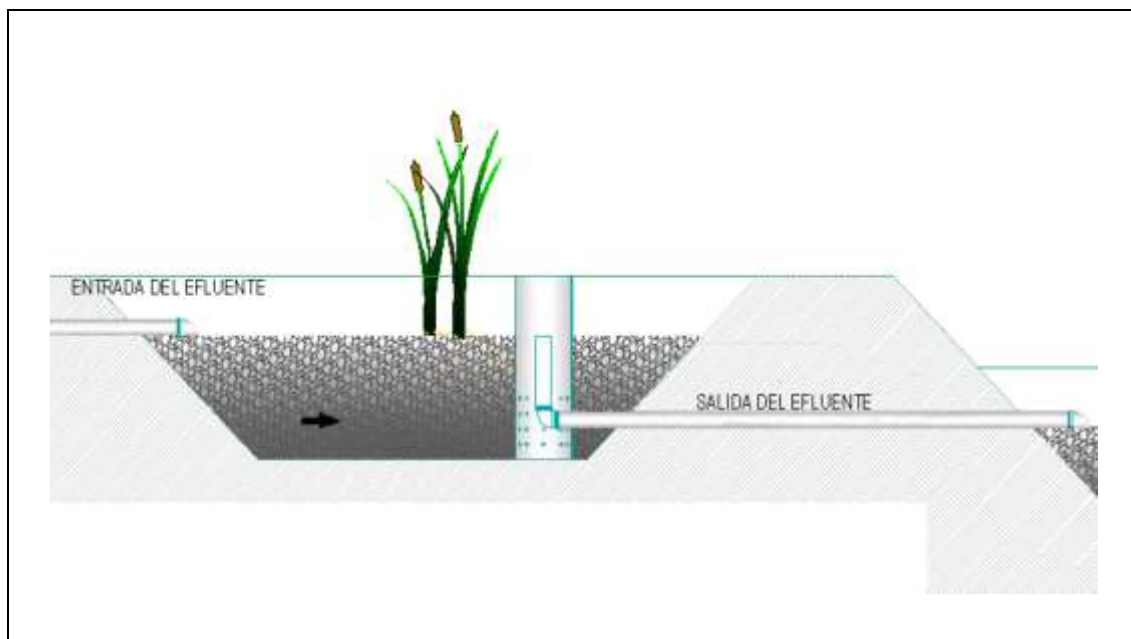


Figura 1-8. Configuración de Humedales de Flujo subsuperficial. Fuente: (Gerber, 2014)

- a) **Humedal construido de flujo subsuperficial Vertical:** Consisten en una cubeta hecha en la tierra (limitada por terraplenes, impermeabilizada por compactación o con film de polietileno), o en una caja de mampostería, rellena de material poroso (grava o arena) y sembrada con plantas acuáticas (Mariñelarena, 2010). Los humedales de flujo vertical pueden ser de flujo descendente (downflow) o de flujo ascendente (upflow) (Saavedra, 2013).

## 1.9 CLASIFICACIÓN DE HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO

### SUBSUPERFICIAL VERTICAL

#### 1.9.1 Humedal con carga vertical descendente

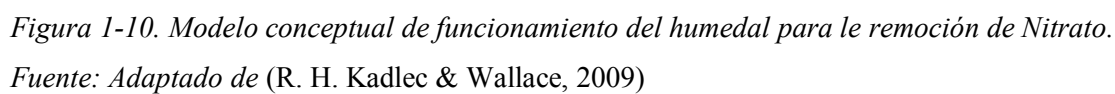
El sistema funciona drenado para garantizar la oxigenación. La biomasa bacteriana establecida sobre el relleno degrada la materia orgánica y nitrifica el amonio liberado. El flujo vertical presenta cierta ventaja respecto del flujo horizontal, ya que además de eliminar la DBO<sub>5</sub> tiene mayor capacidad para nitrificar el agua tratada, inclusive a niveles que sólo se obtienen en sistemas de tratamiento terciario (Arias & Brix, 2003).

Los sistemas de flujo vertical descendente presentan mejores rendimientos en el tratamiento, respecto a la reducción de DBO5 y nitrificación, debido al mejor potencial de aireación de estos sistemas comparados con los de flujo horizontal, así como a su mejor control hidráulico (Bahlo, Wach, & Cooper, 1990). De ahí que en las últimas dos décadas el enfoque haya estado en el desarrollo de estos sistemas compactos para el tratamiento de las aguas residuales domésticas y se hayan elaborado guías de diseño en numerosos países (Brix & Arias, 2005).

### **1.9.2 Humedal con carga vertical ascendente**

Como se menciona en el párrafo anterior, en pasadas décadas se han diseñado sistemas de flujo vertical con diferentes configuraciones de flujo, buscando mejorar la calidad de agua tratadas específicamente en la reducción de nutrientes como el Nitrato y el Fosfato (García & Corzo, 2008). Es por esta razón que este estudio está enfocado en evaluar la eficiencia en remoción de Nitrato en un humedal con Carga Vertical Ascendente.

En los humedales de flujo vertical ascendentes el agua residual ingresa por el fondo, asciende a través del relleno y sale por el drenaje (Figura 1- 9). A diferencia del humedal de flujo vertical descendente el humedal vertical ascendente funciona siempre saturado y anaeróbico en el fondo. En la figura 1-10 se presenta un modelo conceptual del mecanismo de saneamiento del humedal de flujo vertical ascendente para la remoción del Nitrato, y se definen cuáles son las principales vías de transformación del nitrógeno en la raíz de una planta.



### 1.9.3 Generalidades del Diseño de los Humedales

El Dimensionamiento y las características físicas del humedal construido dependen, entre otros factores, de la localización, de las características climáticas del sitio, de las características de calidad del agua afluente, de la calidad del agua efluente deseada, y de las restricciones de calidad de vertido de aguas tratadas, exigida por las autoridades locales, una vez se conozcan las anteriores condiciones.

Con respecto al diseño de las estructuras del humedal y el dimensionamiento de los lechos, es frecuente el uso de ecuaciones de primer orden, de regresiones estadísticas desarrolladas a partir de información obtenida de bases de datos y/o el empleo de modelos empíricos. La tabla 1-3 presenta algunos de los valores típicos que se utilizan como parámetros para el diseño. Estos valores no son estrictamente obligatorios, pero brindan información típica de las condiciones normales de diseño (Arias & Brix, 2003).

*Tabla 1-3. Parámetros típicos de diseño para humedales construidos para tratamiento de aguas residuales domesticas  
 (Adaptado de Constructed wetlands for wastewater treatment in Europa 1998)*

| Tipo de flujo                  | Horizontal                                              | Subsuperficial                                          | Vertical                                                |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Carga orgánica afluente        | $< 112 \text{ DBO}_5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ | $< 150 \text{ DBO}_5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ | $< 112 \text{ DBO}_5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ |
| Carga hidráulica               | $< 5 \text{ cm d}^{-1}$                                 | $< 5 \text{ cm d}^{-1}$                                 | $< 5 \text{ cm d}^{-1}$                                 |
| Tiempo de retención hidráulica | 5-15 días                                               | $> 5$ días                                              | 1-2-días                                                |
| Área específica por PE         | De $5 \text{ m}^2$ a $20 \text{ m}^2$ PE                | De $5 \text{ m}^2$ a $20 \text{ m}^2$ PE                | De $1 \text{ m}^2$ a $5 \text{ m}^2$ PE                 |
| Relación largo-ancho           | 10:1                                                    | 03:01                                                   | NA                                                      |
| Profundidad                    | $< 0,60 \text{ cm}$                                     | $< 0,60 \text{ cm}$                                     | $> 1,00 \text{ cm}$                                     |
| Pendiente del fondo            | $< 0,1 \%$                                              | $< 0,1 \%$                                              | NA                                                      |
| Tipo de relleno                | NA                                                      | Arenas y gravas                                         | Arenas y gravas                                         |
| Vegetación                     | Variable                                                | Variable                                                | Variable                                                |

## 1.10 MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES CONSTRUIDOS

Los humedales pueden tratar con efectividad altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos (SS), nitrógeno y fósforo así como niveles significativos de metales, compuestos orgánicos traza y patógenos (Otálora, 2011). Evidentemente, un amplio rango de procesos biológicos, químicos y físicos tiene lugar. Por lo tanto, la influencia e interacción de cada componente involucrado es bastante compleja (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010). En la siguiente tabla, se muestran los principales procesos y mecanismos que ocurren en los humedales construidos.

*Tabla 1-4. Mecanismos de depuración predominantes en los humedales artificiales.*

| <b>Parámetro evaluado</b> | <b>Mecanismo de remoción</b>                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sólidos suspendidos       | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sedimentación</li> <li>▪ Filtración</li> </ul>                                                                                                                                              |
| Materia orgánica          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Degradación microbiana aerobia</li> <li>▪ Degradación microbiana anaerobia</li> </ul>                                                                                                       |
| Nitrógeno                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Amonificación seguido por nitrificación microbiana y desnitrificación.</li> <li>▪ Asimilación por parte de la plantas Absorción principal</li> <li>▪ Volatilización del amoníaco</li> </ul> |
| Fósforo                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Absorción por parte del lecho</li> <li>▪ Asimilación por parte de la plantas</li> </ul>                                                                                                     |
| Metales                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Asimilación por parte de las plantas</li> <li>▪ Intercambio iónico</li> </ul>                                                                                                               |
| Patógenos                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sedimentación</li> <li>▪ Filtración</li> <li>▪ Muerte natural</li> <li>▪ Radiación ultravioleta</li> </ul>                                                                                  |

Adaptado de (Mena, Rodríguez, & Núñez, 2008)

### **1.10.1 Remoción de sólidos suspendidos**

Aunque la mayor parte de los sólidos suspendidos y sedimentables son removidos en el tratamiento previo, los humedales filtran y sedimentan los remanentes, complementando esta remoción (Delgadillo, Camacho, Pérez, et al., 2010). Estos procesos que son puramente físicos también eliminan una porción significativa de otros contaminantes presentes en las aguas residuales (DBO, nutrientes, patógenos). La velocidad del agua, muy lenta dentro del relleno, favorece ambos procesos. El tratamiento previo es muy importante para evitar obstrucciones y la rápida colmatación del humedal. (Delgadillo, Camacho, & Serie, 2010)

### **1.10.2 Remoción de materia orgánica**

La remoción de materia orgánica tiene lugar principalmente mediante biodegradación aeróbica o anaeróbica. Una pequeña porción también es removida por procesos físicos como la sedimentación y filtración, cuando la materia orgánica es fijada a los sólidos suspendidos. La biodegradación es realizada por los microorganismos adheridos a las raíces de las plantas y a la superficie de los sedimentos. (Delgadillo, Camacho, Pérez, et al., 2010).

### **1.10.3 Remoción de fósforo**

Los procesos de eliminación del fósforo involucran la reacción de ese elemento con una variedad de cationes metálicos como Fe, Al o Ca formando sólidos amorfos como apatita ( $\text{Ca}_5(\text{Cl}, \text{F})(\text{PO}_4)_3$ ), hidroxiapatita ( $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$ ) entre otros. Además de estas reacciones, el P puede coprecipitar con otros minerales como hidróxido férrico ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) o calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) (Mariñelarena, 2010).

### **1.10.4 Remoción de bacterias**

La remoción de estos microorganismos está basada en una combinación de factores físicos, químicos y biológicos. Vymazal, Brix, Cooper, Green, & Haberl, 1998 reportaron remoción de bacterias (coliformes fecales) y enterobacterias en varios humedales en la República Checa, siendo la eficiencia de remoción entre 98% a 99% para estos indicadores bacterianos.

## 1.11 REMOCIÓN DEL NITRÓGENO

En las aguas residuales urbanas el nitrógeno (N) se encuentra fundamentalmente en forma de nitrógeno orgánico y de amonio. No es habitual encontrar concentraciones significativas de nitratos y nitritos. En los humedales el principal mecanismo de eliminación de nitrógeno es microbiano, por los procesos de nitrificación seguido de desnitrificación. Sin embargo, también hay otros procesos que contribuyen a la eliminación como la adsorción del amonio sobre el sustrato y la asimilación por las plantas. En los humedales el ciclo del nitrógeno está acoplado al del carbono (materia orgánica), fundamentalmente a través de la desnitrificación (García & Corzo, 2008).

La nitrificación contribuye a la remoción de nitrógeno por la oxidación del amonio a nitrato. Posteriormente, la desnitrificación reduce el nitrato a nitrógeno gas ( $N_2$ ). Los microorganismos asimilan parte del nitrógeno amoniacal y lo incorporan a su masa celular. Sin embargo, en la mayoría de las aguas residuales hay más nitrógeno del que puede ser asimilado por la biomasa.

- **Nitrificación.**

Es usualmente definida como la oxidación de nitrógeno amoniacal a nitrato, donde el nitrito es un producto intermediario en la secuencia de reacción. La nitrificación es un proceso quimioautotrófico: las bacterias nitrificantes obtienen energía de la oxidación del amonio o nitrito usando el  $CO_2$  como fuente de carbón para la síntesis de células nuevas. La oxidación ocurre en dos etapas: la primera implica la oxidación del nitrógeno amoniacal a nitrito, en la segunda el nitrito es oxidado a nitrato. En ambas etapas la oxidación del N aporta energía al sistema.

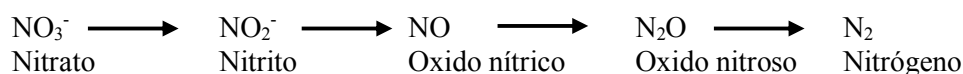
La nitrificación es influenciada por la temperatura, el pH, la alcalinidad del agua, la población microbiana, las concentraciones de oxígeno disuelto y de nitrógeno amoniacal. La temperatura ideal para su desarrollo está entre los 30 y 40 °C, bajas temperaturas disminuyen la velocidad de reacción siendo el valor mínimo para que la nitrificación ocurra 4°C. El rango de pH óptimo para la nitrificación está entre 7,5 y 8,6 unidades y se requieren 4,3 mg de  $O_2$  para oxidar 1 mg de nitrógeno amoniacal hasta nitratos (Paredes & Kuschik, 2001).



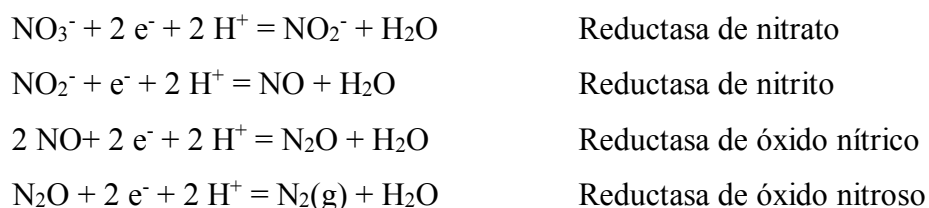
- **Desnitrificación**

La desnitrificación es el proceso microbiano de reducción de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$  a gas  $\text{N}_2$ , que vuelve a la atmosfera (Rittmann & McCarry, 2001). El oxígeno liberado actúa como aceptor de electrones en la respiración bacteriana. La desnitrificación es una capacidad metabólica de muchas bacterias heterótrofas como *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Paracocos* y *Tiobacilos* (*Proteobacterias*), aeróbicas/anaeróbicas facultativas, que pueden alternar entre la respiración con oxígeno y con nitratos (Rittmann & McCarry, 2001)

Se puede utilizar la desnitrificación para el tratamiento avanzado de aguas residuales descargadas en cuencas que deban protegerse de la eutrofización; el tratamiento de residuos de alto contenido de N, como vertidos agrícolas y aguas residuales de establecimientos de alimentos y el tratamiento de agua potable que contiene niveles elevados de  $\text{NO}_3^-$  o  $\text{NO}_2^-$ , para reducir riesgos infantiles. La desnitrificación procede en forma de pasos en los que los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) se reducen secuencialmente a nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), óxido nítrico (NO), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y gas ( $\text{N}_2$ ).



Cada semireacción y la enzima que cataliza se muestran a continuación:



La reacción global de  $\text{NO}_3^-$  a  $\text{N}_2$  reduce el N en 5 equivalentes de electrón por cada N. El primer paso es una reducción de dos electrones, mientras que los tres pasos siguientes son reducción de un electrón para cada N (Rittmann & McCarry, 2001).

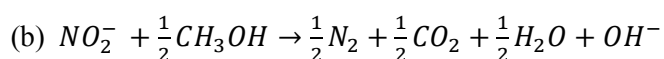
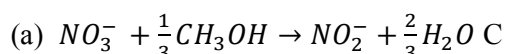
La concentración de oxígeno controla si los aerobios facultativos respiran nitrógeno. Aunque los desnitrificantes no son especialmente sensibles al pH, los valores de pH fuera

del intervalo óptimo entre 7 y 8 pueden conducir a la acumulación de intermedios. En aguas de baja alcalinidad, el control del pH puede resultar un problema, ya que la desnitrificación produce bases fuertes (Rittmann & McCarry, 2001)

La capacidad de desnitrificar está relacionada con la cantidad de sustrato biodegradable presente (relación carbono orgánico/nitrógeno). Generalmente, en los tratamientos biológicos de residuos líquidos, la presencia de sustrato fácilmente degradable es baja. Con una relación carbono nitrógeno (C/N) mayor a 4, la tasa de desnitrificación se incrementa en un factor de 1.5 a 1.7; a relaciones C/N menores a 2.5 no se alcanza una desnitrificación satisfactoria, por lo tanto se necesita una fuente externa de carbono (Helmer-Madhok et al., 2002).

Se ha demostrado que la desnitrificación usando sustratos solubles (etanol, metanol y ácido acético) ha alcanzado eficiencias entre 70 y 95% (Shrimali & Singh, 2001). Schoeman & Steyn (2003), señalan que este porcentaje de remoción es suficiente para mantener las concentraciones de nitrato en niveles aceptados para el agua potable.

Las Ecuaciones (a) y (b) muestran la estequiometría de la desnitrificación cuando se utiliza como fuente de carbono al metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ). Se puede observar además que a diferencia de la nitrificación, existe producción de hidroxilos, que incrementan el pH del medio (Halling-Sorensen & Jorensen, 1993).



Dado que el metanol es relativamente económico, su utilización se ha difundido mucho, dando origen a una base de datos muy grande sobre dicho producto (Rittmann & McCarry, 2001). Sin embargo, es necesario investigar nuevas fuentes de carbono y diseñar sistemas innovadores y robustos para la desnitrificación, que impliquen bajos costos de tratamiento y postratamiento (Soares 2000).

## 1.12 CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LOS HUMEDALES

Para evaluar el desempeño de un humedal construido se debe tener en cuenta cómo estos operan, permitiendo establecer los cambios o transformaciones que se pueden dar en el transcurso del tratamiento. Estos cambios o transformaciones están determinados por

algunos componentes tales como: tiempo de retención, caudal, variación en las concentraciones de contaminantes en el afluente, el clima en la zona, etc. (Lara, 1999)

Los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren dentro de un sistema de humedales construidos están condicionados por el flujo del agua a través del sistema, lo cual mejora o afecta las eficiencias de tratamiento. Como se ha reseñado en diferentes investigaciones, son numerosos los problemas de desempeño en humedales construidos que se pueden atribuir a las malas características hidrodinámicas del sistema (Persson, et al., 1999; Dierberg et al., 2005; Jenkins & Greenway, 2005; Perez & Torres, 2008; Kadlec & Wallace, 2009).

El conocimiento de los procesos que ocurren en los humedales naturales, ha permitido reproducirlos y optimizarlos en humedales construidos diseñados a la medida de las aguas residuales a tratar. Sobre la base de experimentación en laboratorio y en plantas piloto se han desarrollado diferentes metodologías de humedales construidos. (Mariñelarena, 2008)

Los sistemas de humedales construidos son diseñados para tratar una cierta carga hidráulica (población a servir) pero que con el tiempo aumenta o disminuye provocando oscilaciones del caudal de las aguas residuales. La Evaluación de este aspecto es importante ya que es uno de los factores primarios en el éxito o fracaso del sistema. Pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos importantes en la efectividad del tratamiento (Lara, 1999).

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar la evaluación del sistema, se consideraron las siguientes actividades: descripción del sistema experimental, cálculo de volumen y tiempo de retención hidráulica (TRH), alimentación del sistema, muestreo y análisis, tratamiento de datos recopilados y estimación de la eficiencia de remoción de nitrato. Cada una de las actividades mencionadas se describe a continuación (Figura 2-1).

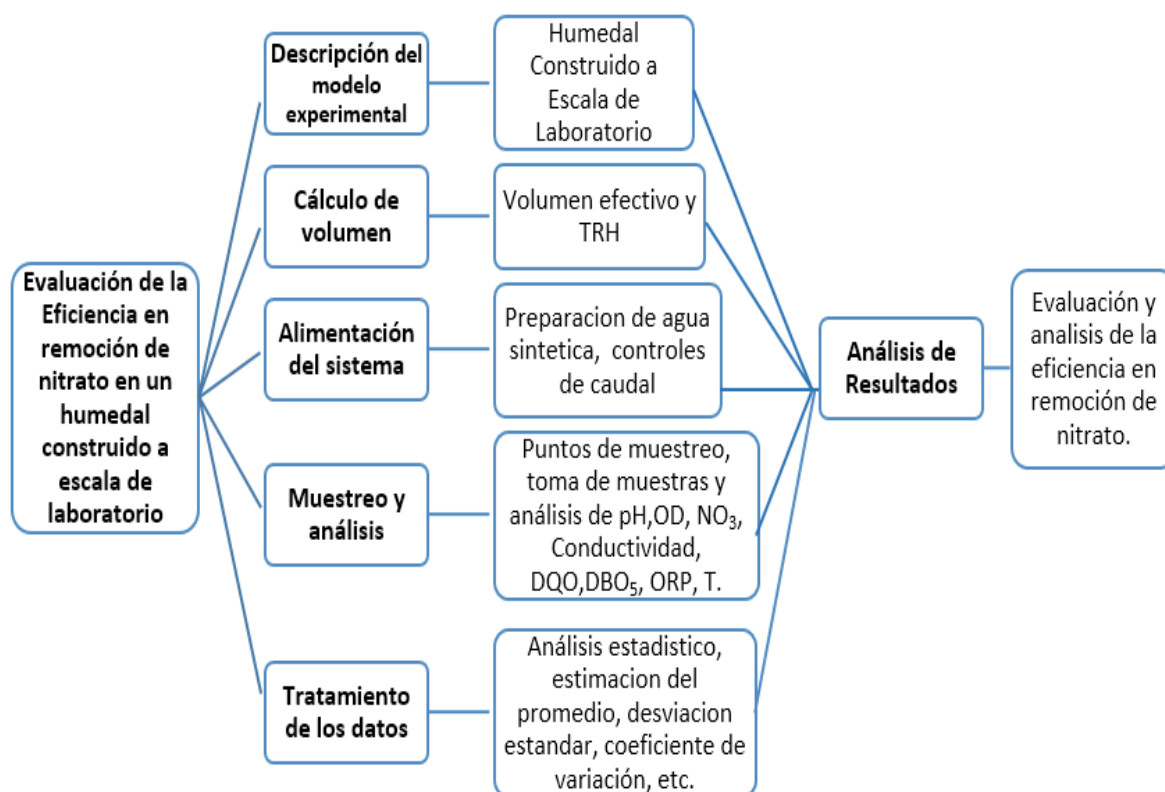


Figura 2-1. Esquema de metodología propuesta

### 2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

El proyecto de investigación fue desarrollado en un humedal construido experimental a escala de laboratorio, instalado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Tecnológica de Panamá.

El modelo simula un humedal de flujo vertical ascendente, construido en un canal rectangular de acrílico con dimensiones de 1,20 m de largo, 0,60 m de ancho y 0,68 m de profundidad. La estructura cuenta con un fondo falso que suministra a través de 200

perforaciones de 6 mm cada una, un flujo uniforme ascendente. Internamente el humedal tiene 1,00 m de largo por 0,59 m de ancho y 0,60 m de profundidad. Figura 2-2.

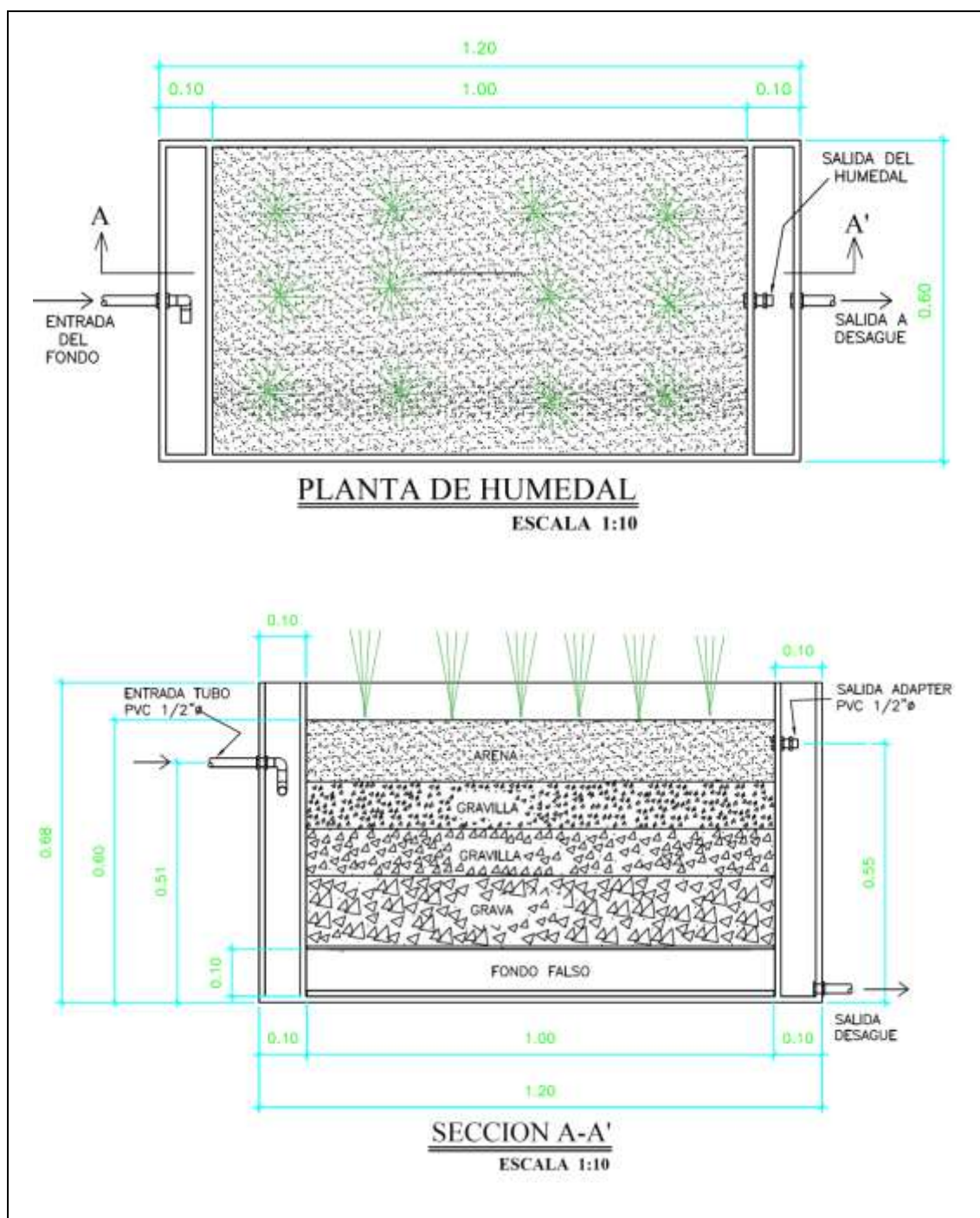


Figura 2-2. Esquema del modelo utilizado

El humedal prototipo fue diseñado siguiendo recomendaciones de Metcalf and Eddy Inc., 1991; Crites & Tchobaglou, 1998; Seoáñez Calvo Mariano, 1999; EPA 832-F-00-023 y Brix & Arias, 1998. Se consideró como reactor de comportamiento hidráulico

en condiciones de flujo pistón y uniforme siguiendo criterios de Werner & Kadlec, 2000; EPA 832-F-00-023 y R. Kadlec & Wallace, 2009.

Se eligió el modelo de flujo subsuperficial (nivel del agua por debajo de la superficie del suelo) para evitar olores y la proliferación de vectores como los mosquitos. Esto tiene importancia en la posible aplicación a escala real, ya que Panamá, por ser un país con clima húmedo tropical, con lluvias durante 9 meses en el año, genera ambientes aptos para la proliferación de mosquitos transmisores de enfermedades como Dengue, Fiebre Zika y Chikunguña.

El humedal fue construido con capas de medios filtrantes donados por el Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales de Panamá (IDAAN). Este material está compuesto de grava, gravilla y arena, para mantener diferente porosidad (promedio =0,37) y fue lavado previo a su uso. En la tabla 2-1 se presenta la estratigrafía del sistema y la porosidad efectiva obtenida de referencia bibliográfica.

*Tabla 2-1. Estratigrafía del humedal construido de Flujo Vertical Ascendente*

| <b>Material</b> | <b>Espesor de capa<br/>(cm)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b><sup>3</sup>Porosidad<br/>efectiva<sup>η</sup></b> |
|-----------------|---------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------|
| Arena           | 15                              | Fina                 | 0,31                                                  |
| Gravilla        | 10                              | 6-10                 | 0,35                                                  |
| Gravilla        | 10                              | 20                   | 0,40                                                  |
| Grava           | 15                              | 25-30                | 0,42                                                  |

---

<sup>3</sup>Valores típicos de sustratos de humedales construidos (Crites and Tchobanoglous 1998)



Material soporte en la superficie (Arena)



Capas de material soporte del humedal construidos

*Figura 2-3. Estratigrafía del humedal construido de Flujo Vertical Ascendente*

El sistema tiene una estructura de entrada compuesta por un tubo de PVC de  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro, el cual sumista el agua a la sección del fondo falso. Este tubo tiene



instalada una llave de paso, la cual permite regular manualmente el caudal del afluente al humedal. Luego de su paso por el relleno, el agua sale por la parte superior del otro extremo de la cubeta por medio de un tubo perforado.

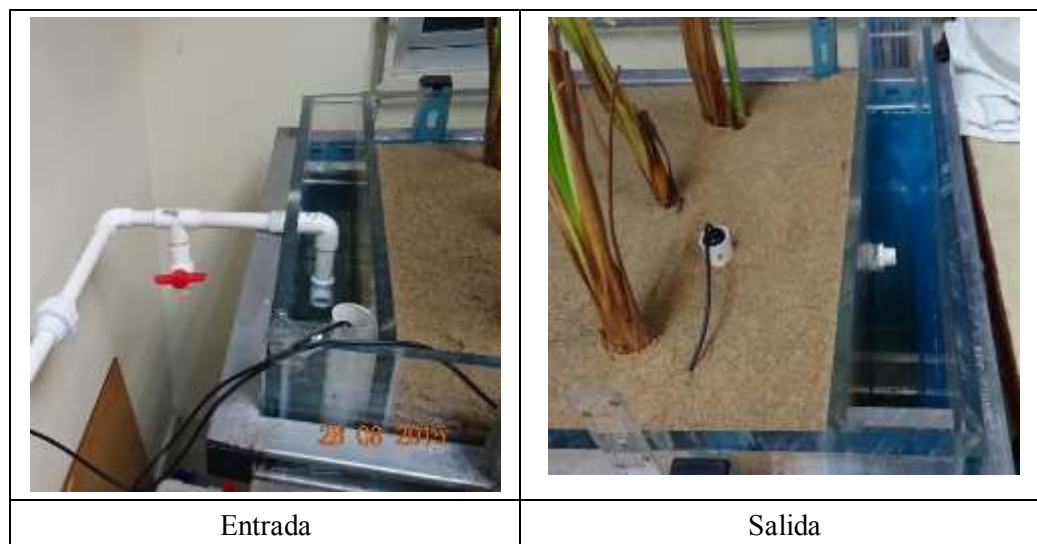


Figura 2-4. Estructuras de entrada y salida del humedal

La vegetación emergente utilizada fue la especie Enea (*Typha angustifolia*). Se escogió esta vegetación porque podía ser adquirida localmente en el lago Gatún y además está adaptada al clima local. Además, las Eneas son fuertes, fáciles de propagar, capaces de producir una biomasa anual grande y típicamente absorben cantidades grandes del nitrato y del fosfato (Yocum, 2006).

El 2 de julio de 2015, se sembraron 10 plantas pero, por presencia de un hongo, cuatro semanas después se debió hacer un replantado, el 8 de agosto. Durante el tiempo de adaptación y estabilización de las plantas, que duro 35 días, por el humedal sólo se hacía circular agua del grifo.





Vista de las Vegetacion utilizada en el modelo Experimental “Etapa Inicial”



Vista de las Vegetacion utilizada en el modelo Experimental “Tercera etapa ”

*Figura 2-5. Vista de las Plantas Typha Angustifolia sembradas en el humedal*

## 2.2 CALCULO DE VOLUMEN Y TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (TRH)

El modelo de humedal tiene un volumen total de  $1,0 \times 0,59 \times 0,6 \text{ m} = 354$  litros. La porosidad, el espacio vacío que queda entre las partículas de relleno, es lo que nos da el volumen efectivo, el cual permitirá calcular el tiempo de retención hidráulica como  $V/Q$  (volumen sobre caudal). Para obtener el volumen efectivo del humedal en forma empírica se procedió a llenar y vaciar el modelo, midiendo el volumen acumulado con recipientes graduados. Así se obtuvo un volumen efectivo de 102 litros, lo que representa una porosidad del 29%.

## 2.3 ALIMENTACIÓN DEL SISTEMA

El sistema fue alimentado con efluente sintético con una concentración de 60mg/l de  $\text{NO}_3$ . Para lograr esta concentración se pesaba en un balanza analítica 29,4260 gramos de nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ) el cual se disolvía en agua destilada en un volumétrico de 1000 ml. Obtenida una mezcla homogénea del nitrato se procedía a agregar el contenido en un tanque de 300 litros. El agua preparada era bombeada a un tanque elevado de 200 litros que alimentaba el sistema y en cuya salida se instaló un sistema de válvulas para controlar el caudal ingresante al modelo.

El componente principal del agua sintética era la concentración de 60 mg/l de  $\text{NO}_3$ , el resto de los componentes se presenta en la siguiente tabla.

*Tabla 2-2. Composición del agua residual sintética*

| Componentes                                       | Descripción                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nitrato de Potasio ( $\text{KNO}_3$ )             | Concentración de 60 mg/l establecida para el estudio.                                                                                                           |
| Sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ )     | Propiedades reductoras, eliminación del cloro libre, eliminación del oxígeno disuelto en agua. 8 ppm por cada 1 ppm de Oxígeno disuelto más 4 ppm como reserva. |
| Difosfato de Potasio ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ) | Agentes de taponamiento del pH, aporte de fosfato como nutriente, 0,5g/l.                                                                                       |
| Metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ )                | Aplicado en la segunda etapa de estudio como fuente de carbono; 2,5 g por cada 4,3 g de $\text{NO}_3$ .                                                         |

En la figura 2-6 se presenta el sistema utilizado para alimentar el humedal durante las etapas experimentales.



*Figura 2-6. Estructuras de entrada y salida del humedal*

### 2.3.1 Etapas de Evaluación del sistema

El sistema a escala de laboratorio se evaluó en tres etapas:

- Etapa 0, consistió en alimentar el humedal con una carga hidráulica baja, sin adición de fuente de carbono, con el objeto de evaluar la capacidad propia del humedal de aportar carbono orgánico para desnitrificar. En esta primera etapa el caudal aplicado fue de 4,2 l/hr, lo que establecía un TRH de 24 horas.
- Etapa 1, consistió en alimentar el humedal con una carga hidráulica media, de 6,6 l/hr, lo que establecía un TRH de 15 horas. Se adicionó una fuente de carbono (metanol).
- Etapa 2, se incrementó la carga hidráulica hasta 10,8l/hr, estableciendo un TRH de 9 horas y se siguió aplicando la fuente externa de carbono.

Para calcular la tasa de remoción se utilizó la siguiente ecuación:  $r = Q \cdot (C_o - C_i) / V$ ,

Donde  $r$  = Tasa de remoción (mg/l/día)

$Q$  = caudal (l/día)

$C_o$  = Concentración del afluente (mg/l)

$C_i$  = Concentración del Efluente (mg/l)

$V$  = volumen (l)

Entre cada etapa de evaluación se esperó un periodo prudencial para la estabilización del sistema.

El porcentaje de eficiencia (E), se calculó como la diferencia entre la concentración de ingreso ( $C_i$ ) y la concentración final ( $C_f$ ) sobre la concentración de ingreso por 100:

$$E(\%) = \left( \frac{C_i - C_f}{C_i} \right) * 100$$

## 2.4 MUESTREO Y ANÁLISIS

Se elaboró un programa de muestreo donde se determinó frecuencia, puntos de muestreo y mecanismo de análisis de acuerdo a lo establecido por el Laboratorio de Sanitaria de la Universidad Tecnológica de Panamá lugar donde se realizaron estas actividades.

Se tomaron muestras en dos puntos, en la entrada (afluente) y salida (efluente). El muestreo consistía en llenar un recipiente de vidrio (vaso de precipitado) de 200 ml de donde se extraían las muestras para los ensayos analíticos. Para cada etapa de evaluación se usaron aproximadamente 6 semanas. Antes de iniciar con los muestreos de cada etapa se usaron entre 4 y 5 días para aclimatar y estabilizar el sistema. Las pruebas experimentales iniciaron octubre de 2015 y finalizaron en febrero de 2016. Durante este tiempo analizaron un total de 21 datos por cada etapa.

Las determinaciones de nitratos se realizaron mediante un electrodo selectivo IntelliCAL™ ISENO 3181, que combina un electrodo selectivo (ISE) de nitratos con una referencia de unión doble no recargable y un sensor de temperatura incorporado. Esta sonda era conectada a un medidor portátil HACH HQ40d digital.

También se midió la temperatura y la conductividad eléctrica con un equipo DECAGON Em 50 de medición automática, conectado a un datalogger. Los sensores de temperatura y conductividad fueron colocados tanto en la entrada como en la salida del humedal y el equipo fue programado para tomar registros cada 15 minutos.

Para los muestreos y la conservación de las muestras se siguieron los protocolos de Standard Methods for Examination of Water and Wastewater y los procedimientos del laboratorio de Sanitaria de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de Panamá tal como se observa en la siguiente tabla.

*Tabla 2-3. Parámetros analizados*

| <b>Parámetros</b>                                 | <b>Frecuencia</b> | <b>Metodología Analítica</b>                             | <b>Equipo</b>                                                                                    |
|---------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| pH                                                | Diaria            | Electrométrico                                           | pHmetro Oakton waterproof pH450                                                                  |
| Oxígeno Disuelto (OD)                             | Diaria            | Electrométrico (Electrodos para oxígeno disuelto)        | Sonda LDO10101, Multiparemetro HQ40D HACH                                                        |
| Temperatura (T°)                                  | Diaria            | Electrométrico                                           | Oakton waterproof pH450 Sensor ES-2Electrical Conductivity +Temperature Decagon Em50 Data Logger |
| Potencial Redox (ORP)                             | Diaria            | Electrométrico                                           | pHmetro Oakton waterproof pH450                                                                  |
| Caudal                                            | Diaria            | Volumétrico                                              | -                                                                                                |
| Nitrato (NO <sub>3</sub> )                        | Diaria            | Ion Selectivo                                            | HACH Modelo IntelliCAL™ISENO 318101 Multiparemetro HQ40D HACH                                    |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO)                  | Diaria            | Digestión con dicromato de potasio y espectrofotométrico | Espectrofotómetro HACH DR 2010 COD Reactor HACH                                                  |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) | Cada 15 días      | Dilución                                                 | Sonda LDO10101                                                                                   |
| Conductividad                                     | Diaria            | Electrométrico                                           | Sensor ES-2 Electrical Conductivity +Temperature Decagon Em50 Data Logger                        |
| Fosforo                                           | Semanal           | HI 93711-0                                               | Espectrofotómetro HACH DR 2010                                                                   |
| Cloro residual                                    | Semanal           | Estándar de certificación KMnO <sub>4</sub>              | HANNA                                                                                            |

En las siguientes figuras se presentan algunos de los equipos y materiales usados durante la investigación.

|                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |
| <p>IntelliCAL™ ISENO 318101, Sonda LDO10101, Multiparemetro HQ40D,</p>              | <p>pHmetro Oakton waterproof pH450</p>                                               |
|   |   |
| <p>Equipo Multiparemetro YSI</p>                                                    | <p>COD Reactor HACH</p>                                                              |
|  |  |
| <p>Espectrofotómetro HACH DR 2010</p>                                               | <p>Luz colocada al modelo para simular condiciones de Sol</p>                        |

|                                                                                                                            |                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|                                           |  |
| <p>Datalogger de Sensores de Conductividad y Temperatura y vista del Dosificador para eliminación del Oxígeno Disuelto</p> | <p>Instrumento y reactivo usado en los análisis de Cloro Residual del agua.</p>    |

Figura 2-7. Equipos analíticos usados en la pruebas

Como aporte adicional al estudio se realizó un análisis bromatológico de las raíces de la planta Enea “*Typha angustifolia*”, el cual se llevó a cabo en el laboratorio de Agronomía de la Universidad de Panamá.

El estudio bromatológico consiste en el análisis proximal de la materia seca. Fue desarrollado en Alemania por Henneberg y Stohmann y es conocido como el método Weende. Consiste en los siguiente pasos (De Gracia, 2011) :

- Materia seca a los 100° C: Calentamiento de la muestra hasta un peso constante a temperaturas por encima del punto de ebullición del agua (100 °C). Esto remueve el agua, por consiguiente la pérdida de peso equivale al contenido de agua. Fuentes de error son el hecho de que cualquier material que se volatiliza a esta temperatura se pierde (ensilajes u otros productos fermentados). Algunos líquidos se oxidan cuando se calientan y por consiguiente aumentan de peso. Se utiliza la determinación con tolueno, secado al vacío y secado en congelamiento, como métodos alternos.



- Lípidos: Extracción con éter del residuo por 4 h. La pérdida de peso luego del secado corresponde a los lípidos.
- Fibra Cruda: Reflujo del residuo del extracto etéreo por 30 min con ácido sulfúrico al 1,25% seguido por 30 min con hidróxido de sodio al 1,25%. El residuo insoluble se seca, pesa e incinera, y la materia orgánica insoluble se denomina fibra cruda, que está constituida por hemicelulosa, celulosa y lignina insoluble.
- Determinación de nitrógeno: método del Kjeldhal. Pequeñas muestras son digeridas en ácido sulfúrico concentrado y toda la materia orgánica es destruida. El nitrógeno en forma de sulfato de amonio, luego es neutralizado con hidróxido de sodio, destilado y el amonio es llevado a una solución ácida estándar y titulado.
- Cenizas: incineración por dos horas a 600° C. Las altas temperaturas pueden alterar la forma de algunos minerales y pueden volatilizar algunos como el cloro, zinc, selenio y yodo.
- Extracto Libre de Nitrógeno: El cálculo de esta fracción se considera como la materia seca no determinada por la suma del extracto etéreo, fibra cruda, cenizas y proteína ( $N \times 6,25$ ). compuesto principalmente de carbohidratos altamente disponibles, tales como azúcares y almidón, pero también puede contener hemicelulosa y lignina, especialmente en forrajes.

Con este estudio se buscó determinar la composición química y disponibilidad de nutrientes que contenían las raíces de la planta usada en el humedal, con la finalidad de tener un indicio de cuáles podrían ser los componentes disponibles durante la degradación de las raíces dentro del modelo. Los parámetros analizados en este estudio se presentan en la siguiente tabla 2-4, y en la figura 2-8, se muestran algunas imágenes de los procedimientos y equipos utilizados durante las pruebas.

*Tabla 2-4. Parámetros analizados en Prueba de Bromatología*

| Parámetro        | Método Analítico                                                                      |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Materia seca     | Horno de convección de aire caliente a una temperatura de 60 -65 °C por 24 a 72 horas |
| Materia orgánica | Horno de convección de aire forzado a 105 °C durante 24 horas                         |
| Ceniza           | Incinerador a 500 °C durante 2 horas.                                                 |
| Nitrógeno        | Método de Kjeldhal                                                                    |
| Proteínas        | % N x 6,25                                                                            |
| Humedad          | Diferencia entre 100- % de peso de materia seca                                       |
| Magnesio         | Espectrometría de emisión atómica de llama                                            |
| Fósforo          | Colorimétrico                                                                         |
| Potasio          | Espectrometría de emisión atómica de llama                                            |
| Sodio            | Espectrometría de emisión atómica de llama                                            |
| Hierro           | Espectrometría de emisión atómica de llama                                            |
| Cobre            | Espectrometría de emisión atómica de llama                                            |
| Manganeso        | Espectrometría de emisión atómica de llama                                            |
| Zinc             | Espectrometría de emisión atómica de llama                                            |





*Figura 2-8. Análisis bromatológico de Raíces de Planta Typha Angustifolia.*

## 2.5 TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Los datos recopilados se analizaron mediante el uso de estadística descriptiva básica, comparando los promedios de cargas y tasas de remoción, sus desviaciones estándar, sus valores máximos y mínimo y sus coeficientes de variación, usando el programa Mitab® 16.

Con el fin de determinar si hubo o no diferencias significativas de remoción de Nitrato ( $\text{NO}_3$ ) en el humedal, se realizó un análisis de diferencias de media de la variable de Nitrato tanto en la entrada como en la salida del humedal con la ayuda de la prueba T-student para cada etapa del proyecto. Esta misma prueba se aplicó para determinar si existía diferencia de media de la variable de nitrato en la salida del humedal en la etapa 0 (sin metanol) y la salida de la etapa 1 (con metanol). Este análisis fue realizado con el programa estadístico PASW Statistic Versión 18.

Para llevar a cabo este análisis estadístico se cumplieron con los siguientes pasos:

- Prueba de Normalidad de las Variables:** tomando como resultado las pruebas de Shapiro-Wilk.
- Aplicación de la Prueba T-Student para variables relacionadas:** Al cumplirse normalidad de los valores se procedió a utilizar la prueba T-student para muestras relacionadas.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 3-1 se presentan los caudales y tiempo de retención hidráulica a las que fue sometida el humedal en las distintas etapas de experimentación.

*Tabla 3-1. Operación del Humedal construido a escala de Laboratorio*

| <b>Etapas</b> | <b>Caudal (l/hr)</b> | <b>TRH (hr)</b> | <b>Observación</b>               |
|---------------|----------------------|-----------------|----------------------------------|
| 0             | 4,2                  | 24              | Sin adición de fuente de carbono |
| 1             | 6,6                  | 15              | Adición de fuente del carbono    |
| 2             | 10,8                 | 9               | Adición de fuente del carbono    |

#### 3.1 NITRATO

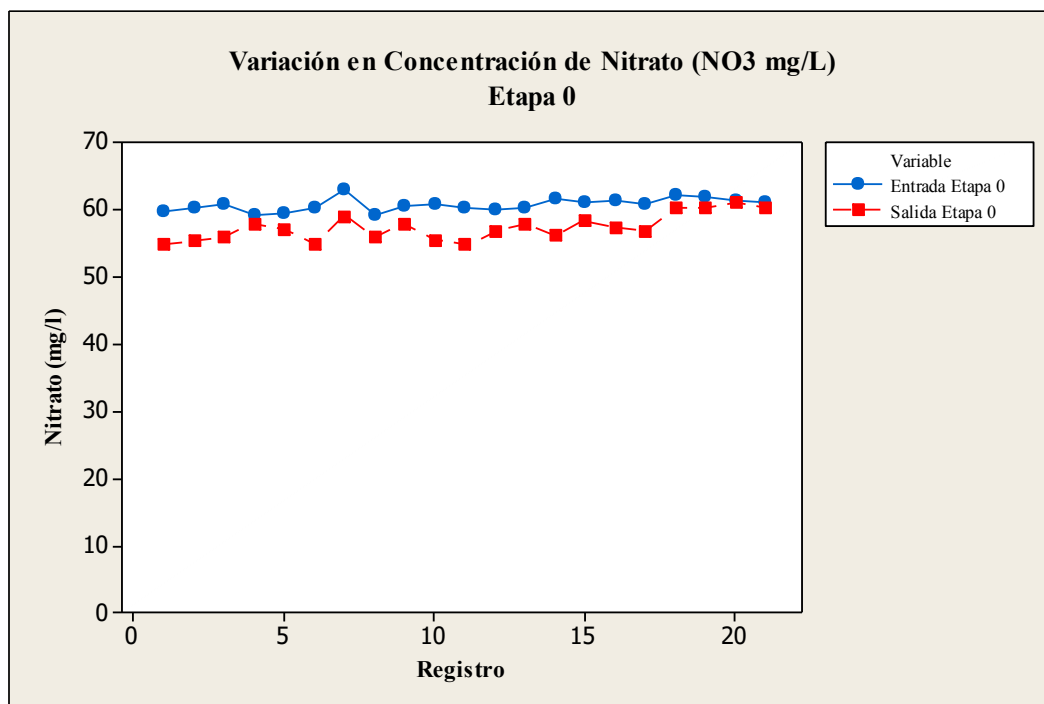
En la tabla 3-2 se presenta el análisis estadístico de las concentraciones de  $\text{NO}_3$  en la entrada y la salida del humedal a lo largo del estudio. Durante todas las etapas del ensayo los valores medios de la entrada fueron muy similares y estables (60,7; 60,8 y 60,3) mg/l respectivamente. Los valores medios de la salida en la etapa 0 (57,30 mg/l), fueron muy diferentes de los de las etapas 1 (5,59 mg/l) y 2 (4,94 mg/l), aunque muy estables, con coeficientes de variación de 3%, 11% y 12% respectivamente. Se asume que esta poca variabilidad de los datos es debido a que se trató de controlar todos aquellos factores que podían influir en mal funcionamiento del sistema.

*Tabla 3-2. Análisis de Estadística descriptiva de las concentraciones de Nitrato ( $\text{NO}_3$ )*

|                                  | <b>Etapas 0</b> |               | <b>Etapas 1</b> |               | <b>Etapas 2</b> |               |
|----------------------------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|
|                                  | <b>Entrada</b>  | <b>Salida</b> | <b>Entrada</b>  | <b>Salida</b> | <b>Entrada</b>  | <b>Salida</b> |
| <b>Media</b>                     | 60,66           | 57,30         | 60,80           | 5,59          | 60,28           | 4,94          |
| <b>Error Típico</b>              | 0,21            | 0,43          | 0,23            | 0,13          | 0,23            | 0,13          |
| <b>Mediana</b>                   | 60,75           | 57,00         | 60,66           | 5,80          | 60,10           | 4,97          |
| <b>Moda</b>                      | 59,10           | 55,90         | 60,10           | #N/A          | 60,00           | 5,90          |
| <b>Desviación Estándar</b>       | 0,98            | 1,96          | 1,08            | 0,61          | 1,06            | 0,59          |
| <b>Varianza de la muestra</b>    | 0,96            | 3,84          | 1,16            | 0,38          | 1,12            | 0,35          |
| <b>Curtosis</b>                  | 0,03            | -0,88         | -0,11           | -0,09         | -0,20           | -0,94         |
| <b>Coefficiente de asimetría</b> | 0,31            | 0,45          | 0,63            | -0,77         | -0,05           | -0,02         |
| <b>Rango</b>                     | 3,80            | 6,24          | 4,20            | 2,27          | 4,00            | 1,90          |
| <b>Mínimo</b>                    | 59,10           | 54,70         | 59,20           | 4,13          | 58,00           | 4,00          |
| <b>Máximo</b>                    | 62,90           | 60,94         | 63,40           | 6,40          | 62,00           | 5,90          |
| <b>Cuenta</b>                    | 21              | 21            | 21              | 21            | 21              | 21            |
| <b>Coefficiente de variación</b> | 2%              | 3%            | 2%              | 11%           | 2%              | 12%           |

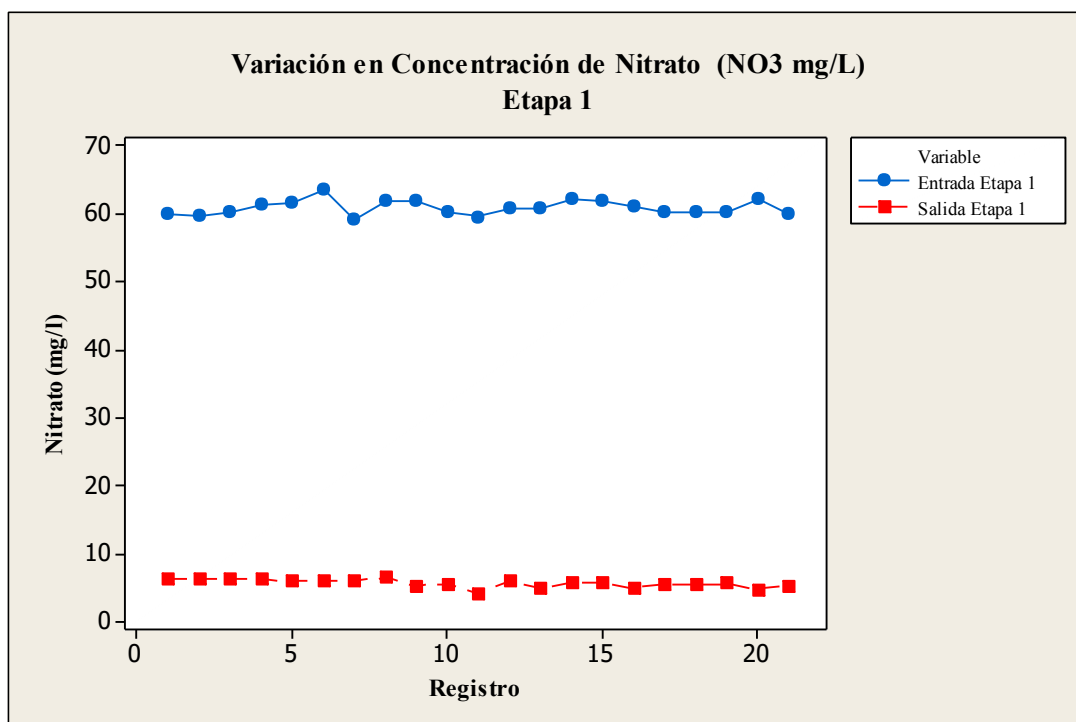
En los siguientes gráficos se presentan los comportamientos de la concentración de  $\text{NO}_3$  en mg/l para cada una de las etapas de estudio.

En la etapa 0, se determinaron valores de entrada entre 59,19 y 62,90 mg/l, mientras que en la salida los valores fueron entre 54,70 y 60,94 mg/l. Como se observa no existió mucha diferencia en la concentración de nitrato en la salida del humedal respecto a la entrada.

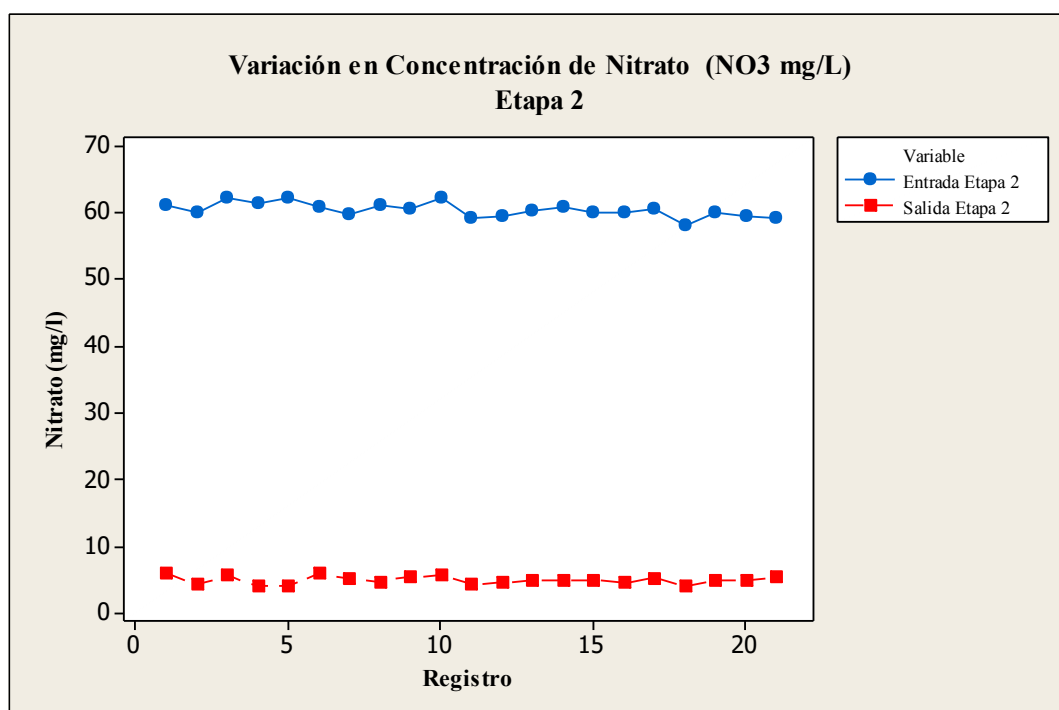


*Gráfica 3-1 Variación en Concentración de nitrato en el Humedal -Etapa 0*

La etapa 0 se diseñó sin agregado de carbono para evaluar la capacidad propia del humedal de aportar carbono orgánico producto de las raíces, detritos, exudados, etc., que pudiera servir como sustrato para desnitrificar. Como se puede ver en el gráfico, no existió mucha diferencia entre las concentraciones de nitratos de la entrada y la salida lo que parece indicar que el humedal no aportaba el carbono orgánico suficiente y que el proceso de desnitrificación estaba limitado o ausente. Se asume que la falta de aporte de carbono interno del humedal, se debía a la falta de desarrollo y maduración de la población vegetal plantada.



Gráfica 3-2 Variación en Concentración de nitrato en el Humedal -Etap 1

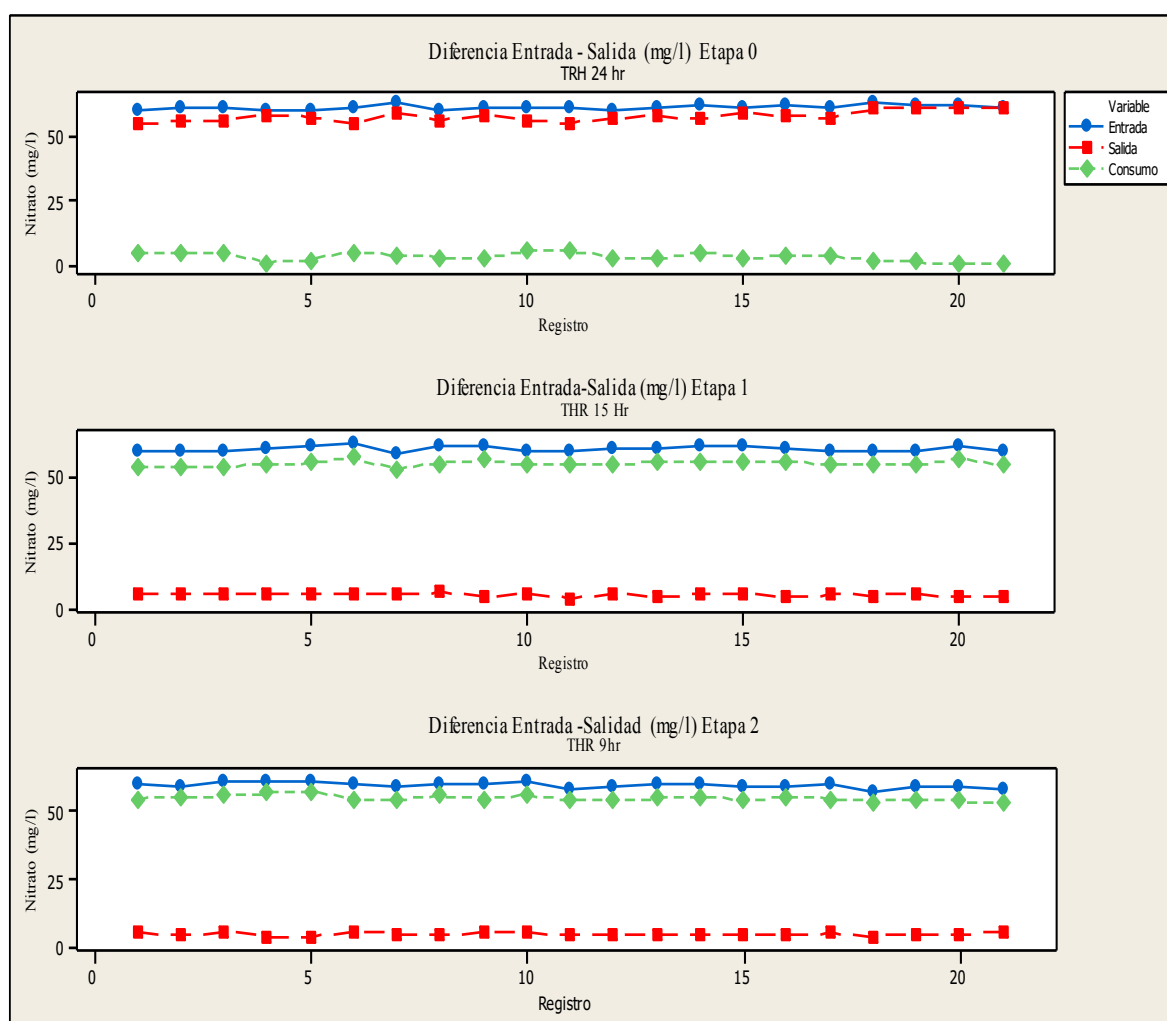


Gráfica 3-3 Variación en Concentración de nitrato en el Humedal -Etap 2

Como se aprecia en las gráficas 3-2 y 3-3, durante las etapas 1 y 2 existió una diferencia significativa en las concentraciones de nitratos en la salida del humedal

respecto a la entrada. Los valores de la entrada mantuvieron el promedio entre 60,8 y 60,2 mg/l de  $\text{NO}_3$ , mientras que las concentraciones de salida promedio registradas fueron de 5,59 mg/l  $\text{NO}_3$  para la etapa 1 y 4,94 mg/l de  $\text{NO}_3$  para la etapa 2.

En la siguiente gráfica se muestra el consumo de  $\text{NO}_3$  mg/l según el TRH aplicado en cada etapa.



Gráfica 3-4 Consumo de  $\text{NO}_3$  mg/l según etapa de estudio

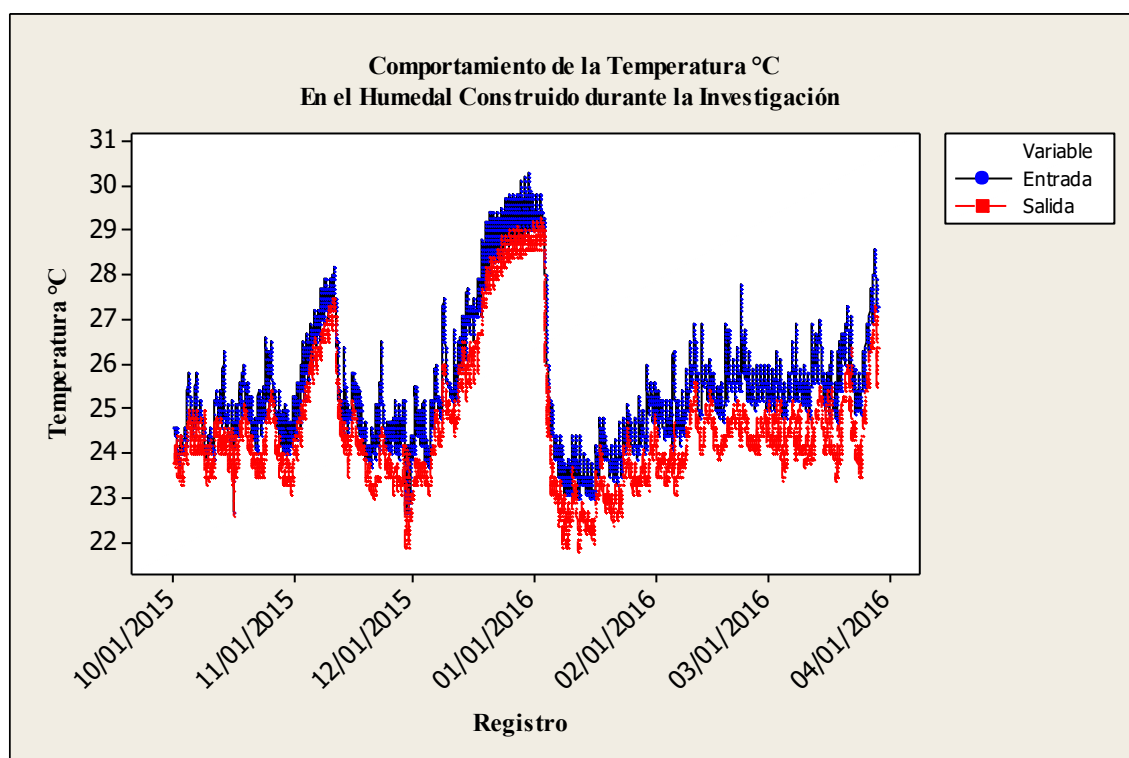
Se asume que la aplicación de metanol en estas dos etapas, aportó la fuente de carbono necesaria para que dentro del humedal se realizara de forma eficiente el proceso de desnitrificación.

## 3.2 TEMPERATURA

Los valores promedio de temperatura medidos en la entrada y la salida del humedal fueron de 25,53 °C y 24,67 °C respectivamente. Como se aprecia en el grafico 5, en el mes de diciembre se registra un incremento de la temperatura en el sistema. Esto se debió a que durante ese mes el sistema central de aire acondicionado del laboratorio no se encontraba en funcionamiento por estar la Universidad en receso académico.

Tabla 3-3. Valores promedios de temperatura registrados durante la etapa de investigación

| Temperatura (T°) | Entrada (T°) | Salida (T°) |
|------------------|--------------|-------------|
| Promedio         | 25,53        | 24,67       |
| Max              | 30,30        | 29,30       |
| Min              | 22,70        | 21,9        |



Gráfica 3-5 Comportamiento de la Temperatura en el humedal construido durante la investigación



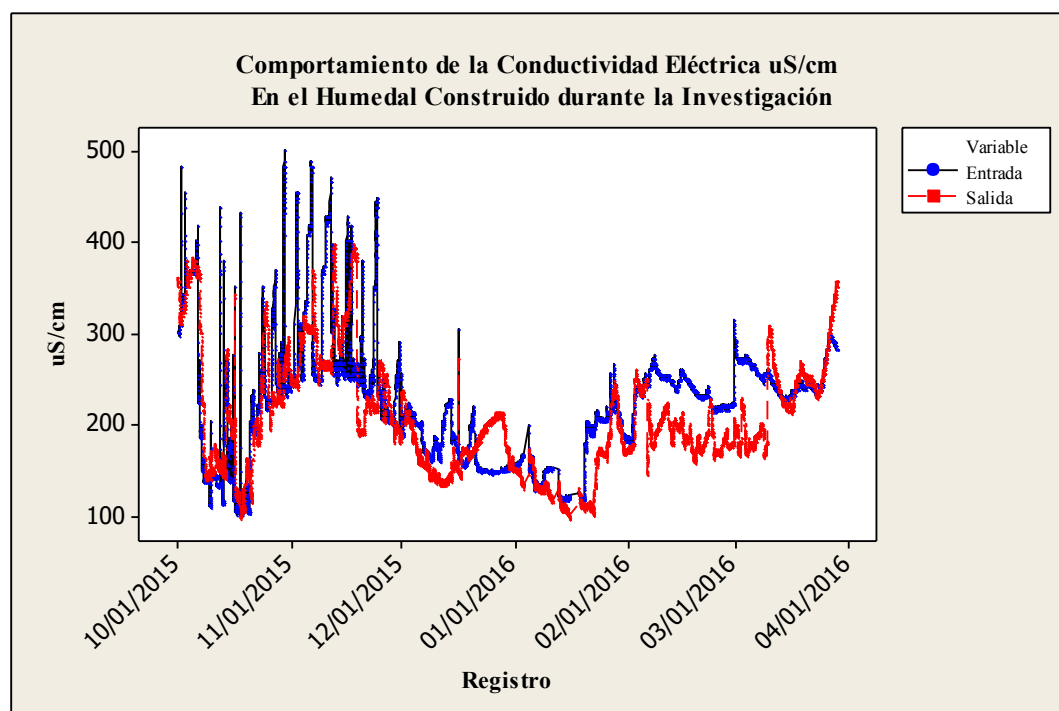
### 3.3 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad eléctrica fue medida en la entrada y salida del humedal durante todo el periodo de prueba. Los resultados indican mayores rangos en la entrada que en la salida. Esto se puede deber principalmente a que como el agua utilizada para tratar contenía el concentrado de sales de Nitrato de potasio que se utilizaba en la mezcla esto generaba una mayor conductividad en este punto.

Los valores promedio obtenidos en la entrada y la salida fueron 226,61 y 209,32 uS/cm, respectivamente. Sin embargo, podemos indicar que con el resultado de este tratamiento, para los tiempos de retención ensayados, no se incrementa significativamente la conductividad. Este dato es importante, ya que se puede determinar si este sistema puede ser apto para reutilizar la descarga a sistemas de riegos agrícolas, sin incrementar el aporte de sales por agua aplicada.

Tabla 3-4. Valores promedios de la Conductividad Eléctrica registrados durante la investigación

| Conductividad Eléctrica | Entrada(uS/cm) | Salida(uS/cm) |
|-------------------------|----------------|---------------|
| Promedio                | 226,61         | 209,32        |
| Max                     | 501,19         | 398,11        |
| Min                     | 102,45         | 97,61         |



Gráfica 3-6 Comportamiento de la conductividad durante la investigación

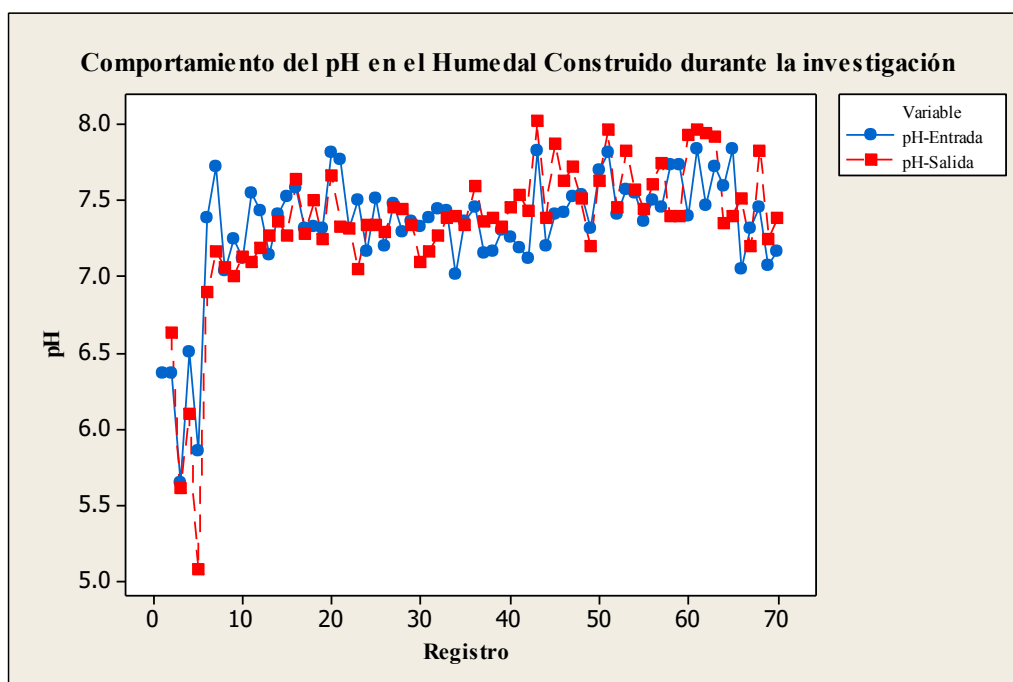
### 3.4 pH

En la tabla 3-5 y gráfica 3-7, se muestran los valores de pH medidos a lo largo del experimento. En la etapa 0, después de 10 días en que estabilizó el sistema, el pH no vario entre la entrada y la salida. En esta etapa casi no hubo actividad desnitrificante (eficiencia de remoción 6%). En las etapas 1 y 2, con eficiencias de remoción > 90% se midió un incremento del pH a la salida en forma sostenida. Este incremento era esperable como producto de la actividad desnitrificante y se estima que fue moderado debido que al agua de alimentación se le adicionó un agente de tamponamiento.

La desviación estándar calculada para los datos, muestran un bajo grado de dispersión con respecto a los valores promedios obtenidos.

Tabla 3-5. Valores promedios de pH registrados durante la etapa de investigación

| Variable pH | Promedio | Desviación Estándar | Mínimo | Máximo |
|-------------|----------|---------------------|--------|--------|
| E-0         | 7,31     | 0,34                | 6,36   | 7,81   |
| S-0         | 7,31     | 0,22                | 6,64   | 7,66   |
| E-1         | 7,38     | 0,22                | 7,01   | 7,82   |
| S-1         | 7,53     | 0,26                | 7,06   | 7,96   |
| E-2         | 7,45     | 0,23                | 7,05   | 7,84   |
| E-2         | 7,54     | 0,22                | 7,20   | 8,02   |



Gráfica 3-7 Comportamiento del pH en el humedal construido durante la investigación

### 3.5 POTENCIAL REDOX

En la gráfica 3-8 se presenta el comportamiento del potencial redox durante toda la etapa de investigación, donde se aprecia que los valores se mantuvieron en los rangos entre 173 y 244. Estos resultados nos indican que en el modelo del humedal construido se generaron las condiciones ambientales necesarias para la ocurrencia de algunos metabolismos microbianos anaerobios como la reducción de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Mn}^{4+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ . Los valores de ORP más bajos se registraron en la etapa 2, momento de la mayor actividad de respiración anóxica (desnitrificación).

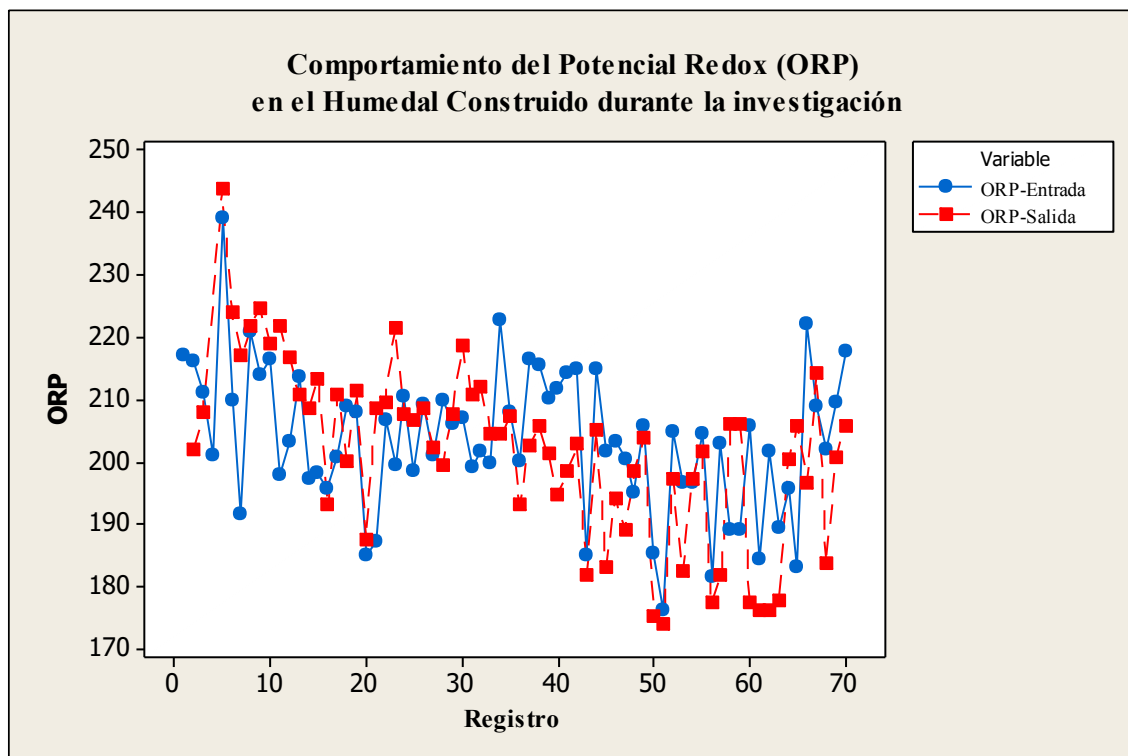
Tabla 3-6. Valores promedios de Potencial Redox registrados durante la etapa de investigación

| ORP      | Entrada | Salida |
|----------|---------|--------|
| Promedio | 203     | 201    |
| Max      | 239     | 244    |
| Min      | 176     | 173    |

Tabla 3-7. Características de humedales según el Potencial Redox

| Zona               |     | Potencial Redox                           | Reducción favorable                         |
|--------------------|-----|-------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>Aerobia</b>     | I   | $E_h > +300 \text{ mV}$                   | Reducción $\text{O}_2$                      |
| <b>Facultativa</b> | II  | $+100 \text{ mV} > E_h > +300 \text{ mV}$ | Reducción $\text{NO}_3^-$ $\text{Mn}^{4+}$  |
|                    | III | $-100 \text{ mV} > E_h > 100 \text{ mV}$  | Reducción $\text{Fe}^{3+}$ $\text{Mn}^{2+}$ |
| <b>Anaerobia</b>   | IV  | $-200 \text{ mV} > E_h > -100 \text{ mV}$ | Reducción $\text{SO}_4^{2-}$                |
|                    | V   | $E_h < -200 \text{ mV}$                   | Formación de $\text{CH}_4$                  |

Fuente: Adaptado de (R. H. Kadlec & Wallace, 2009)



*Gráfica 3-8 Comportamiento del Potencial Redox durante la investigación*

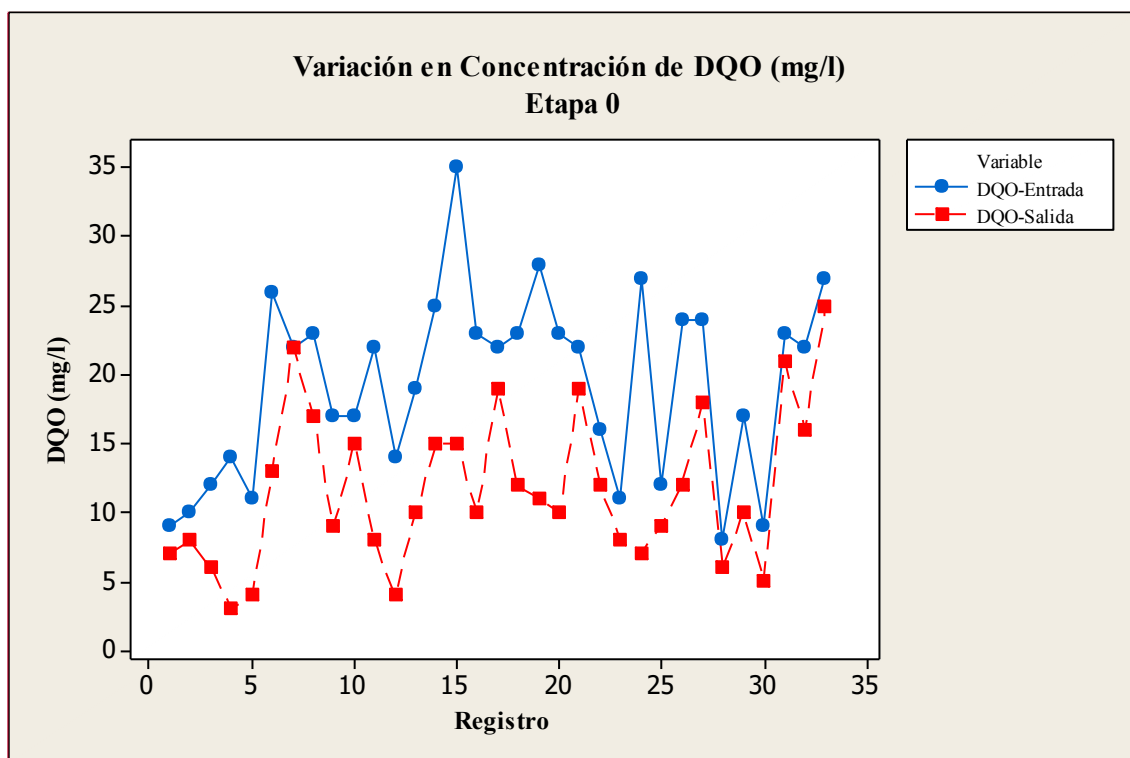
### 3.6 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO).

Para la etapa 0 se obtuvo un promedio de 19,30 mg/l en la entrada y 11,69 mg/l en la salida, como se aprecia estos valores son relativamente bajos, y esto nos permitió evaluar que era necesario adicionar una fuente de carbono externa ya que el humedal experimental no aportaba carbono orgánico suficiente para realizar el proceso de desnitrificación.

Con la adición de la fuente externa de Carbono (metanol) en la etapa 1 y 2 se pudo apreciar un leve incremento en la concentración de DQO registrando valores medios de 41,05 mg/l en la entrada y 21, 2 mg/l en la salida, registro que además destaca la capacidad del humedal de remover materia orgánica.

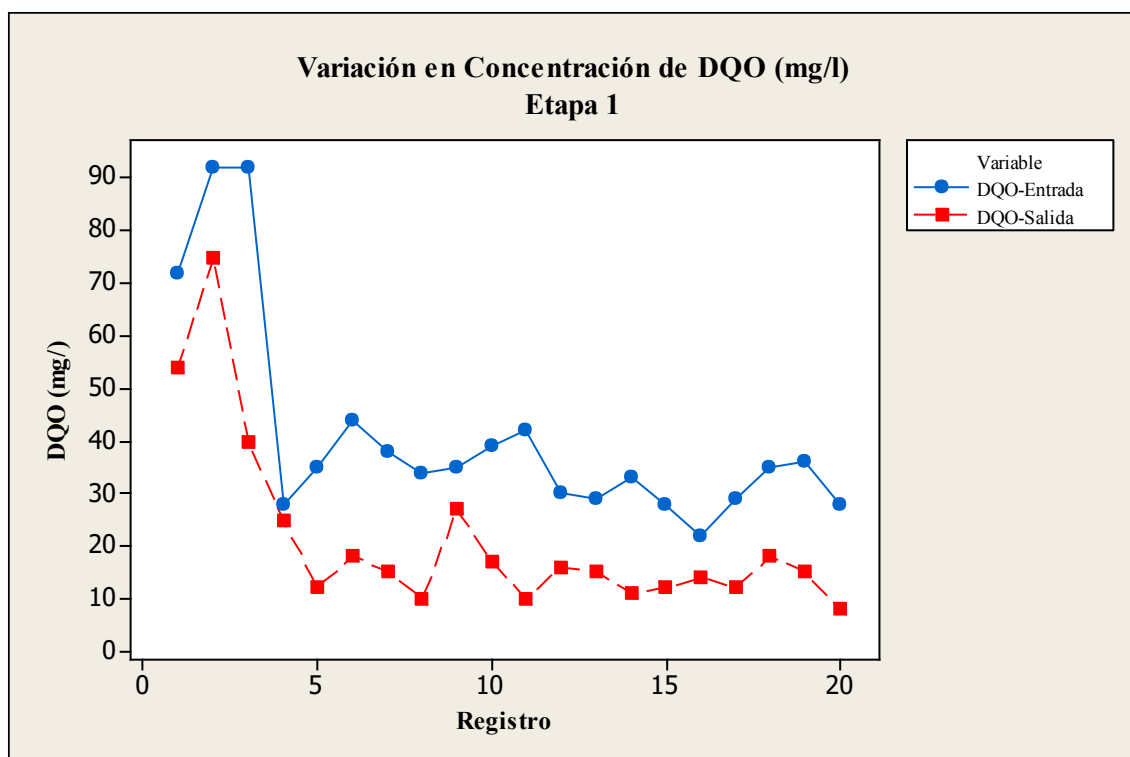
*Tabla 3-8. Valores promedios de DQO registrados durante la etapa de investigación*

| <b>DQO (mg/l)</b> | <b>Entrada Promedio (mg/l)</b> | <b>Salida Promedio (mg/l)</b> |
|-------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Etapa 0           | 19,30                          | 11,69                         |
| Etapa 1           | 41,05                          | 21,2                          |
| Etapa 2           | 31,8                           | 13,6                          |

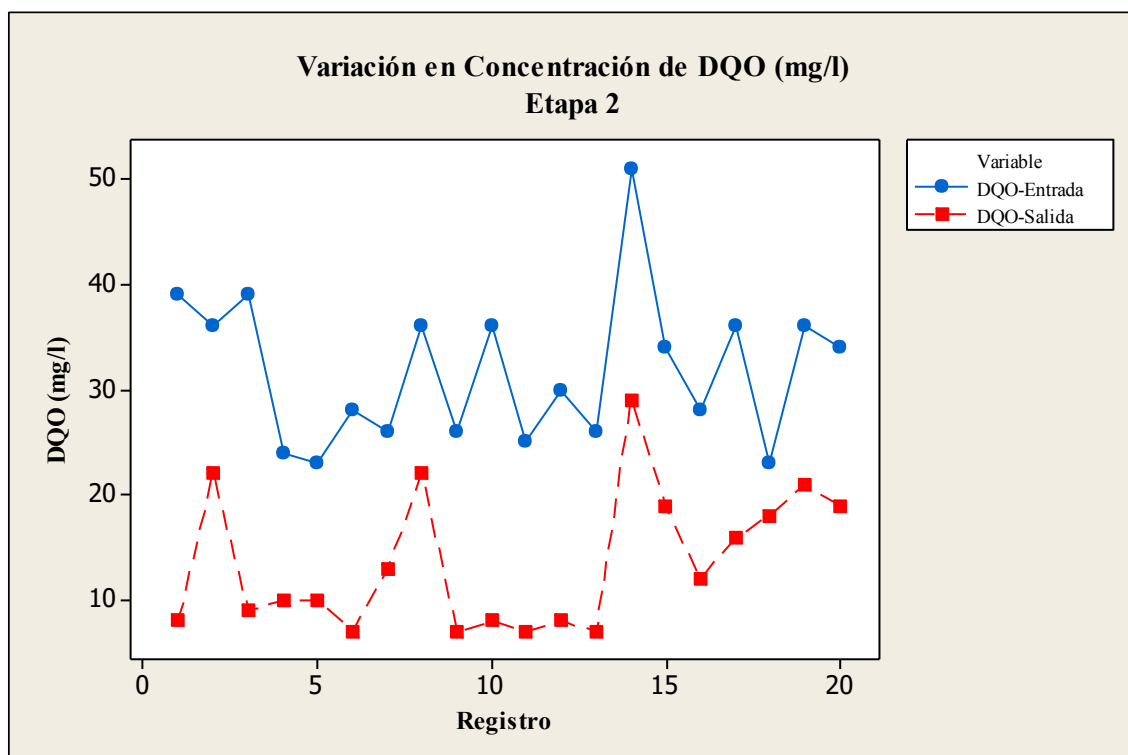


[MN1]

Gráfica 3-9 Variación en Concentración de DQO en el Humedal -Etapa 0



Gráfica 3-10 Variación en Concentración de DQO en el Humedal -Etapa 1



Gráfica 3-11 Variación en Concentración de DQO en el Humedal -Etapa 3

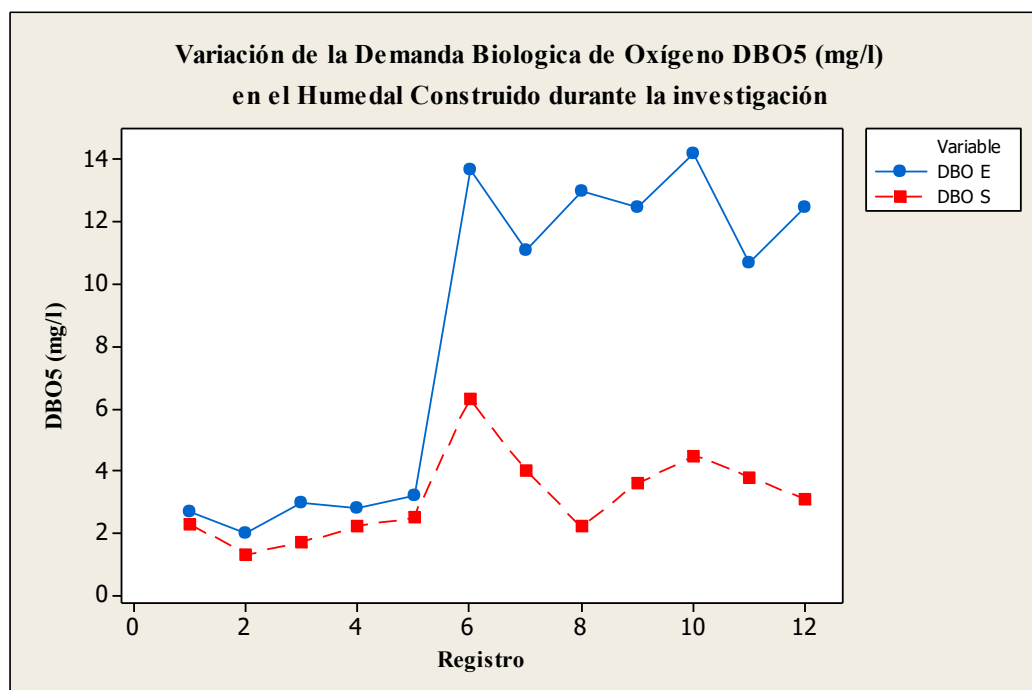
### 3.7 DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO<sub>5</sub>).

Como se aprecia en la gráfica 3-12 los primeros registros de la etapa 0 muestran valores por debajo 5 mg/l, debido principalmente a que en esta fase los aportes de materia carbonácea que contenía el agua eran relativamente bajos.

A medida que se comenzó a agregar metanol al sistema, se registró un aumento de esta variable. Siempre se registraron valores menores en la salida, reflejando una buena remoción de este parámetro tal como lo establece la bibliografía. En la tabla 3-9 se muestra el valor medio, máximo y mínimo que mantuvo el humedal construido referente a la capacidad de remoción de la DBO<sub>5</sub> durante la investigación.

Tabla 3-9. Capacidad de remoción de DBO<sub>5</sub> en el humedal construido durante la investigación

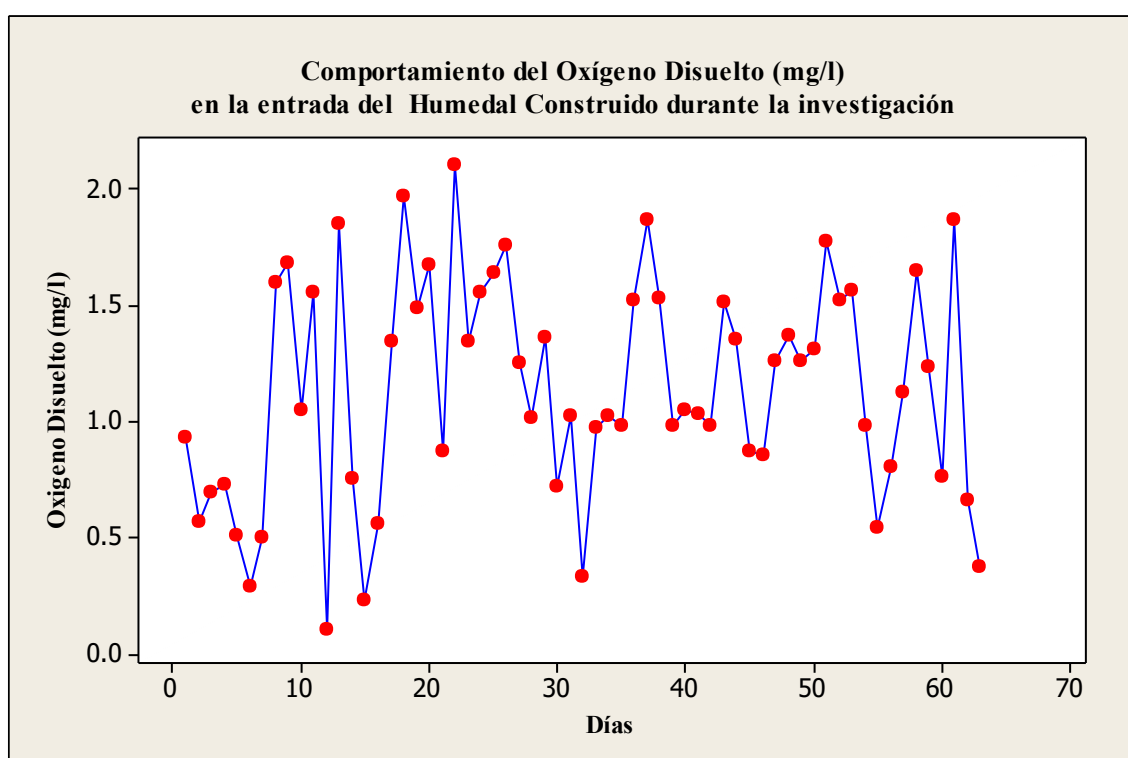
| Carga removida de DBO <sub>5</sub> | g/m <sup>2</sup> /día |
|------------------------------------|-----------------------|
| Promedio                           | 2,03                  |
| Mínimo                             | 0,06                  |
| Máximo                             | 4,7                   |



*Gráfica 3-12 Variación en Concentración de DBO5 en el humedal construido durante la investigación*

### 3.8 OXÍGENO DISUELTO Y CLORO RESIDUAL

Las concentraciones de oxígeno disuelto y cloro residual fueron monitoreados y controlados continuamente. Durante las etapas de estudio se mantuvo en la entrada del sistema un oxígeno disuelto menor a 2 mg/l, para incentivar el proceso de desnitrificación (gráfica 3-13). Debido a que el agua utilizada para preparar la mezcla de nitrato provenía del sistema de agua potable, se monitoreó periódicamente el cloro residual tanto en la entrada como en la salida del sistema, registrando valores menores de 0,5 ppm.



*Gráfica 3-13 Comportamiento del Oxígeno Disuelto en la entrada del humedal construido durante la investigación*



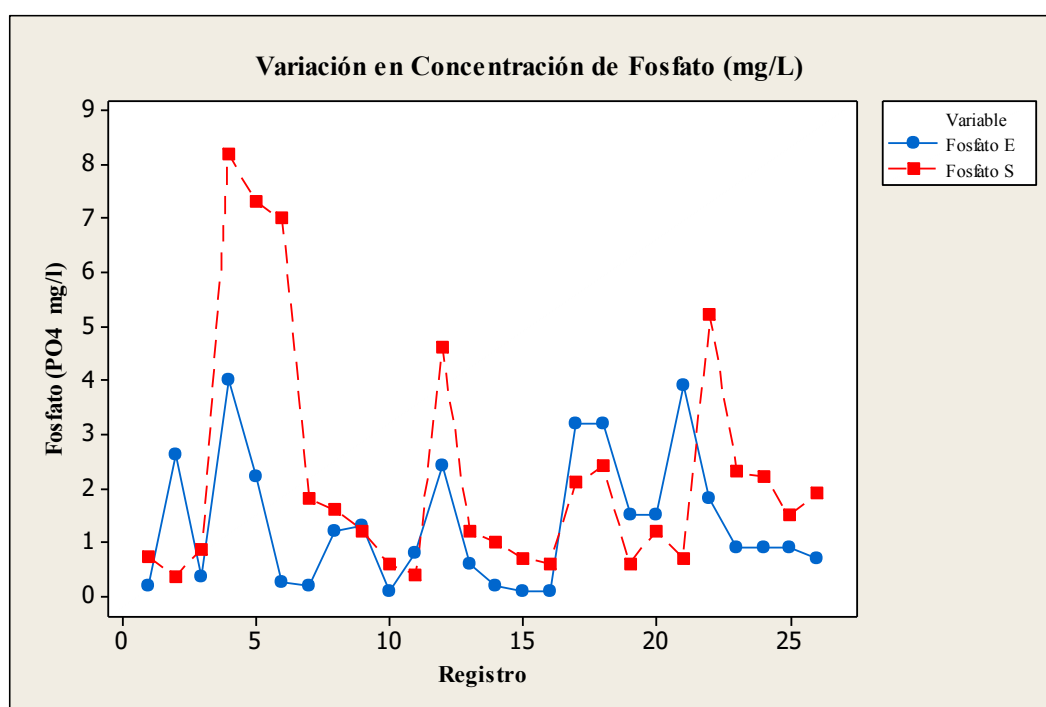
### 3.9 FOSFATO

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran concentraciones bajas de fosfato, debido a que el único aporte de este nutriente en el agua preparada era el fosfato de potasio ( $K_2HPO_4$ ) que se usó como agente de tamponamiento del pH. En contraste, el fosfato estuvo generalmente en niveles más bajos en la entrada que en la salida del humedal, con valores medios de 1,35 y 2,24 mg/l, respectivamente.

Las consideraciones que podemos aportar con referencia a esta diferencia se debe a que las plantas pueden ingresar al sistema concentraciones de fósforo a través del proceso de muerte y degradación de las raíces. Esta consideración fue corroborada con los resultados obtenidos de la prueba bromatológica aplicado a las raíces de la planta *Typha Angustifolia* cuyo valor encontrado de fósforo fue de 503 mg/kg (Tabla 3-14).

Tabla 3-10. Valores promedios de Fosfato registrados durante la etapa de investigación

| Fosfato  | Entrada(mg/l) | Salida(mg/l) |
|----------|---------------|--------------|
| Promedio | 1,35          | 2,24         |
| Max      | 4,0           | 8,2          |
| Min      | 0,1           | 0,36         |



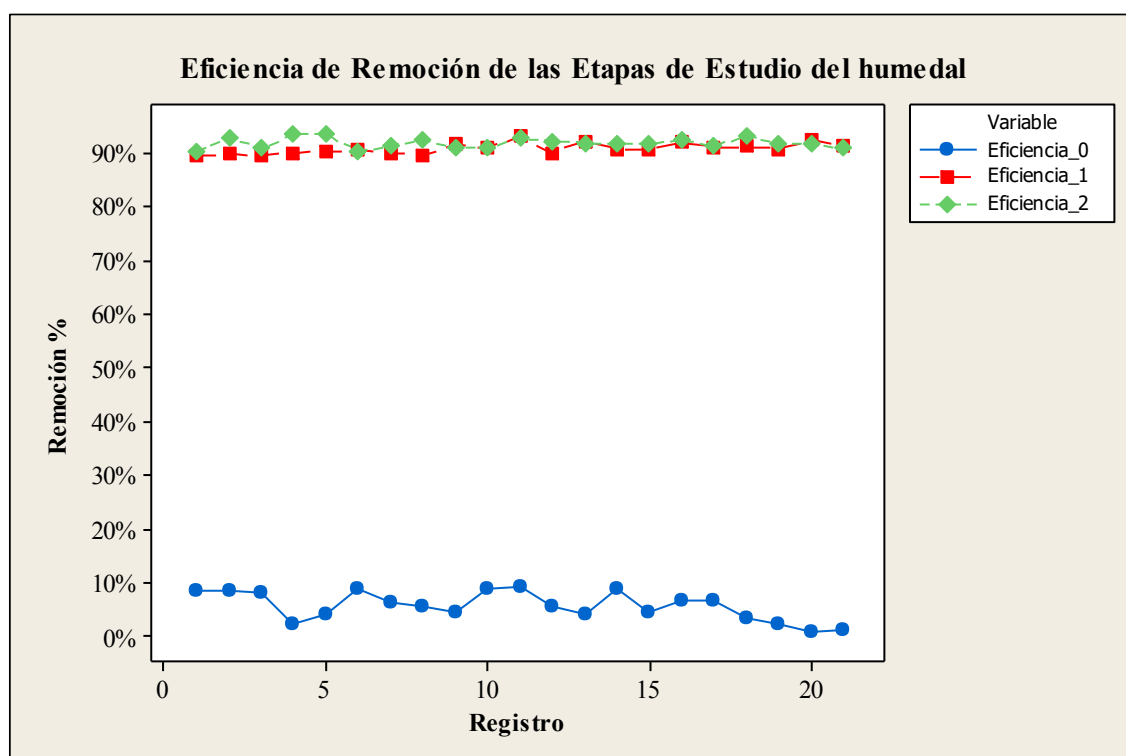
Gráfica 3-14 Variación en concentración de Fosfato en el Humedal

### 3.10 REMOCIÓN DE NITRATOS

Durante las tres etapas del experimento la concentración de nitratos del agua de alimentación del sistema se mantuvo en el intervalo de 60 – 61 mg NO<sub>3</sub>/L. En la etapa 0 el promedio de concentración en la salida fue de 57,3 mgNO<sub>3</sub>/L y los promedios de las etapas 1 y 2 fueron 5,59 y 4,94 mgNO<sub>3</sub>/L respectivamente, que por diferencia permitió calcular consumos promedio de 3,36; 55,2 y 55,3 mg NO<sub>3</sub>/L para cada una de las etapas. Estos consumos equivalen a eficiencias de remoción porcentuales de 6%, 91% y 92% para cada etapa respectivamente. Tabla 3-11.

Tabla 3-11. Condiciones operativas y consumo de nitratos en cada etapa de estudio.

|          | Caudal | TRH | Conc.NO <sub>3</sub> | Conc.NO <sub>3</sub> | Dif. E-S | Remoción |
|----------|--------|-----|----------------------|----------------------|----------|----------|
|          | L/d    | hs  | Entrada              | Salida               | mg/L     | %        |
| Etapla 0 | 100,8  | 24  | 60,7                 | 57,3                 | 3,4      | 6        |
| Etapla 1 | 158,4  | 15  | 60,8                 | 5,6                  | 55,2     | 91       |
| Etapla 2 | 259,2  | 9   | 60,3                 | 4,9                  | 55,3     | 92       |



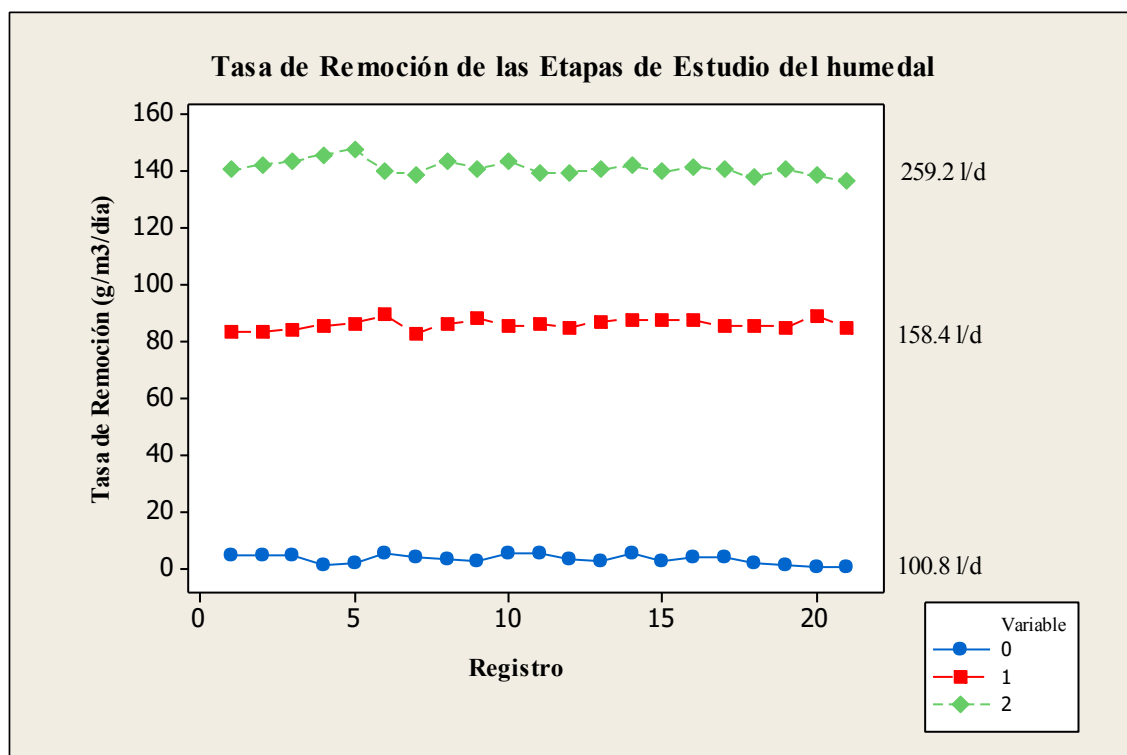
Gráfica 3-15 Eficiencia de remoción del sistema

En la etapa 0 el caudal promedio aplicado fue de 100,8 L/d. En la etapa 1, el caudal se incrementó a 158,4 L/d con la misma concentración de nitratos y el agregado de metanol como fuente de carbono. Tabla 3-11. Si bien esto significó un incremento del 57% de la carga de nitratos (en masa) y una reducción del 36% del tiempo de residencia hidráulica, el consumo de nitratos del humedal pasó de 0,3 a 8,7 g NO<sub>3</sub>/d (Tabla 3-12) y la tasa de remoción porcentual se incrementó de 6% a 91%. Estos resultados demuestran el papel preponderante que juega la fuente de carbono en el proceso de desnitrificación y que el humedal, en las condiciones en que se realizó este experimento, no podía aportar la cantidad de carbono necesaria para alimentar ese proceso por ser un sistema inmaduro, en que las raíces de las plantas todavía no se habían establecido debidamente.

En la etapa 2 se aplicó un caudal de 259,2 L/d con la misma concentración de nitratos y de metanol, lo que significó un incremento del 63% de caudal respecto de la etapa 1 (158,4 L/d), un incremento del 62% de la carga de nitratos (en masa) y una reducción del 39 % del tiempo de residencia hidráulica. Tabla 3-11. En estas condiciones de trabajo el consumo de nitratos del humedal pasó de 8,7 a 14,3 g NO<sub>3</sub>/d (Tabla 3-12), incrementando todavía algo más la eficiencia de remoción a 92%.

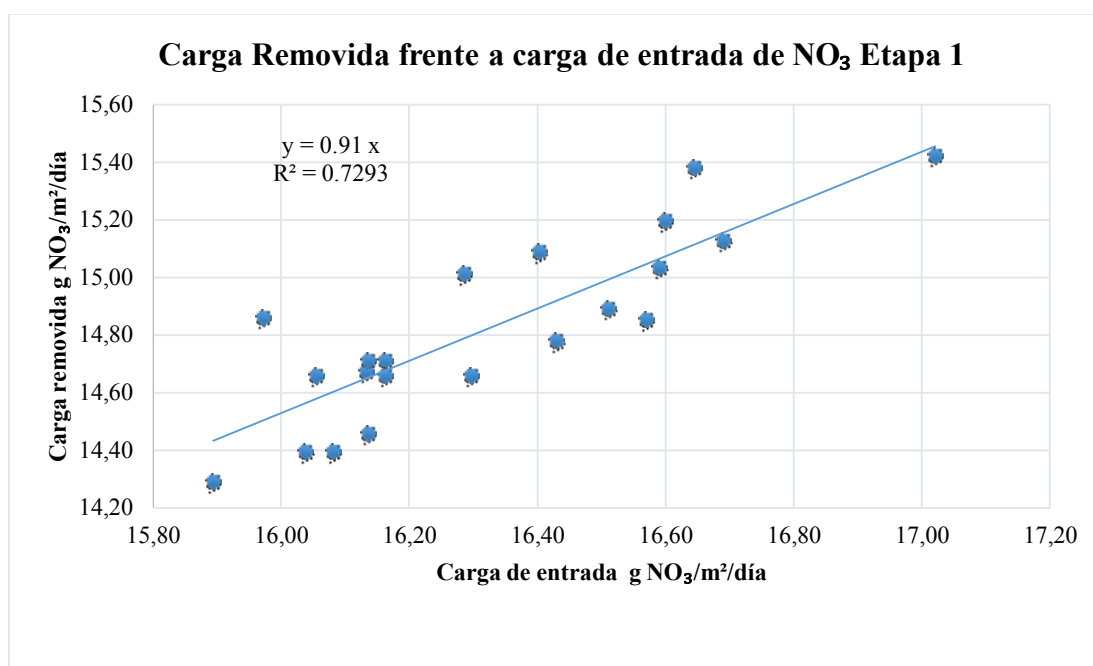
*Tabla 3-12. Resultado del análisis de la tasa de remoción en las etapas de estudio*

|         | Remoción             | Remoción                                | Remoción                                | Remoción                             |
|---------|----------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|
|         | g NO <sub>3</sub> /d | g NO <sub>3</sub> /m <sup>2</sup> Hum.d | g NO <sub>3</sub> /m <sup>3</sup> Hum.d | g NO <sub>3</sub> /m <sup>3</sup> .d |
| Etapa 0 | 0,34                 | 0,57                                    | 0,96                                    | 3,32                                 |
| Etapa 1 | 8,75                 | 14,82                                   | 24,70                                   | 85,74                                |
| Etapa 2 | 14,34                | 24,31                                   | 40,52                                   | 140,63                               |

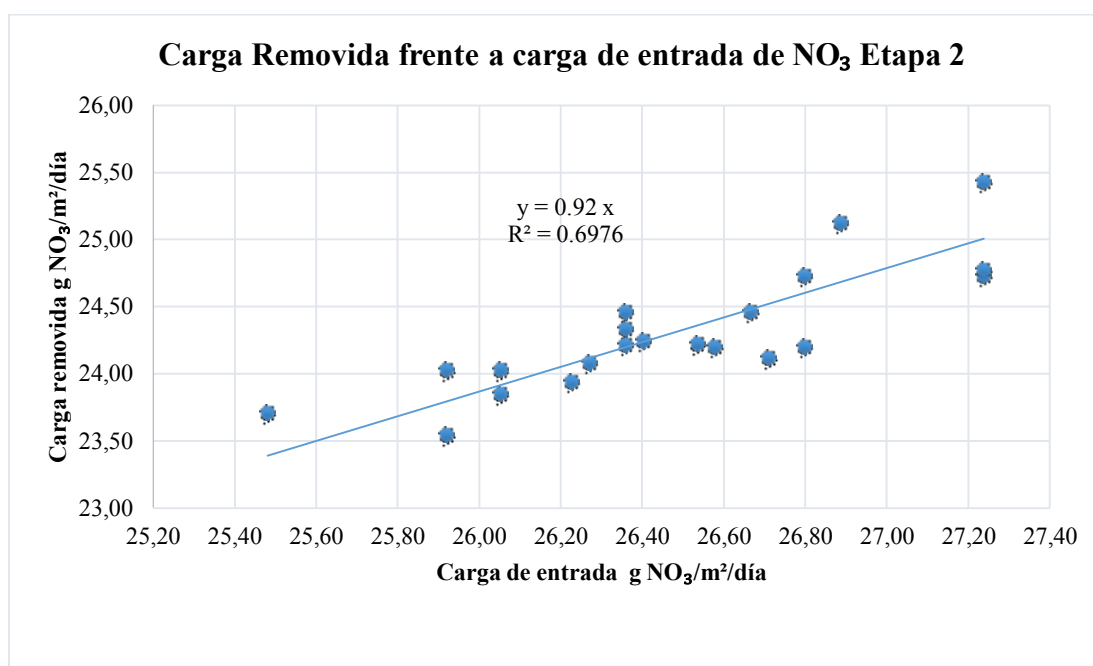


Gráfica 3-16 Tasa de remoción vs Concentración de Nitrato

En las gráficas 3-17 y 3-18 se muestran las ecuaciones cuyas pendientes representan las tasas de remoción de la carga de  $\text{NO}_3$  aplicada al humedal construido en cada etapa. Se puede observar que las tasas fueron sostenidas y estables (entre 91 y 92%), aún en las condiciones de mayor carga ( $>24 \text{ g NO}_3/\text{m}^2.\text{d}$ ). Estos resultados no permiten establecer la tasa máxima de remoción de  $\text{NO}_3$  que podría alcanzar el humedal construido de flujo vertical ascendente, pero nos permiten suponer que puede estar todavía muy por encima de los valores medidos y demuestran la utilidad de esta tecnología para el objetivo propuesto.



Gráfica 3-17 Carga removida frente Carga de entrada de NO<sub>3</sub>-Etapa 1



Gráfica 3-18 Carga removida frente Carga de entrada de NO<sub>3</sub>-Etapa 2

En las condiciones de trabajo mencionadas y con las dinámicas de consumo de nitratos medidas, se calcularon las siguientes tasas de remoción de nitratos por unidad de

volumen de líquido que circulaba por el humedal. En la etapa 0: 3,3 g NO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>.d; en la etapa 1: 85,7 g NO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>.d y en la etapa 2: 140,6 g NO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>.d. Tabla 3-12. Estos valores permiten formar una idea de mínima de la cantidad de nitratos que se puede remover del agua mediante esta tecnología.

Para establecer una medida que permita relacionar las tasas de remoción mencionadas con el potencial de un humedal vertical de flujo ascendente y tener una herramienta para extrapolar sus dimensiones a otros casos de aplicación, se puede expresar que la remoción de nitratos por unidad de superficie de humedal fue de 0,57; 14,8 y 24,3 g NO<sub>3</sub>/m<sup>2</sup>.d. en las etapas 0, 1 y 2 respectivamente. Tabla 3-12.

De la misma forma que con la remoción por unidad de área, los consumos de nitratos medidos permitieron calcular remociones de nitratos por unidad de volumen de humedal del orden de 0,96; 24,7 y 40,5 g NO<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>.d, en cada etapa, respectivamente. Tabla 3-12.

### **3.11 RESULTADO DEL ANÁLISIS BROMATOLÓGICO DE RAÍCES DE ENEA**

#### **“*TYPHA ANGUSTIFOLIA*”**

Como se muestra en la tabla 3-13, las raíces contienen un 83,6% de materia orgánica, mientras que la materia inorgánica (Ceniza) resulto estar representada por 16,9%, durante la elaboración de este estudio se guardó gran cuidado en cuanto al manejo de los raíces y sus limpieza con el fin de reducir los porcentajes de error, ya que muestras altamente contaminadas con suelo u otro material nos da como resultado un alto contenido de ceniza.

El nitrógeno presente en la muestra fue de 0,89%, adicional a este resultado en pruebas bromatológicas de forrajes este dato también puede ser expresado como proteína cruda disponible la cual mostro un resultado de 6,03%. Este factor está relacionado con el hecho de que la proteína, en términos generales, contiene un 16% de nitrógeno, por lo que el factor se obtiene de la relación 100/16.

El porcentaje de humedad obtenido de la muestra fue de 83,37%; no se logró identificar en este caso la madurez fisiológica de la muestra ya que en la bibliografía no se encontró resultados comparativos de muestras de raíces de la planta Enea.

Entre los resultados analizados de compuestos minerales en la muestra podemos mencionar el hierro el cual muestra un resultado de 2,48 mg/kg, sodio 0,91 mg/kg, manganeso 202 mg/kg y zinc 42 mg/kg.

*Tabla 3-13. Resultado del análisis bromatológico de raíces de la planta Typha angustifolia*

| <b>Parámetro</b>               | <b>Unidad</b> | <b>Base Seca</b> |
|--------------------------------|---------------|------------------|
| <b>Materia seca</b>            | %             | 100              |
| <b>Materia orgánica</b>        | %             | 83,6             |
| <b>Ceniza</b>                  | %             | 16,9             |
| <b>Fibra cruda</b>             | %             | 30,38            |
| <b>Extracto Etéreo (Grasa)</b> | %             | 0,57             |
| <b>Extracto No Nitrogenado</b> | %             | 46,62            |
| <b>Nitrógeno</b>               | %             | 0,89             |
| <b>Proteínas</b>               | %             | 6,03             |
| <b>Humedad</b>                 | %             | 83,37            |
| <b>Magnesio</b>                | %             | 0,57             |
| <b>Calcio</b>                  | %             | 1,56             |
| <b>Potasio</b>                 | %             | 0,87             |
| <b>Sodio</b>                   | %             | 0,91             |
| <b>Hierro</b>                  | %             | 2,48             |
| <b>Fósforo</b>                 | mg/kg         | 503              |
| <b>Cobre</b>                   | mg/kg         | 15               |
| <b>Manganeso</b>               | mg/kg         | 202              |
| <b>Zinc</b>                    | mg/kg         | 42               |

### 3.12 RESULTADO DE LA PRUEBA T-STUDENT PARA MUESTRAS RELACIONADAS

#### 3.12.1 Análisis de la media de las entradas y salidas del humedal en las tres etapas de Estudio,

En los siguientes puntos se presentan los resultados obtenidos.

**Hipótesis:** Que la media de los valores de Nitrato ( $\text{NO}_3$ ) en la entrada del Humedal construido es mayor, que la media de los valores de  $\text{NO}_3$  de la salida del humedal construido.

Como se observa en la tabla 3-14 el  $P_{\text{valor}}$  en cada de una de las variables en la tres etapas de evaluación del humedal mantienen un valor mayor a  $\alpha$  (0,05), por lo cual podemos concluir que existe una distribución normal de las variables.

*Tabla 3-14. Prueba de Normalidad de los valores obtenidos durante las pruebas experimentales*

|                                | Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup> |    |        | Shapiro-Wilk |    |                    |
|--------------------------------|---------------------------------|----|--------|--------------|----|--------------------|
|                                | Estadístico                     | gl | Sig.   | Estadístico  | gl | $P_{\text{valor}}$ |
| $\text{NO}_3$ Entrada- Etapa 0 | 0,081                           | 21 | 0,200* | 0,978        | 21 | 0,895              |
| $\text{NO}_3$ Salida-Etapa 0   | 0,116                           | 21 | 0,200* | 0,934        | 21 | 0,165              |
| $\text{NO}_3$ Entrada-Etapa 1  | 0,189                           | 21 | 0,048  | 0,943        | 21 | 0,253              |
| $\text{NO}_3$ Salida-Etapa 1   | 0,155                           | 21 | 0,200* | 0,932        | 21 | 0,150              |
| $\text{NO}_3$ Entrada-Etapa 2  | 0,091                           | 21 | 0,200* | 0,968        | 21 | 0,686              |
| $\text{NO}_3$ Salida Etapa 2   | 0,099                           | 21 | 0,200* | 0,959        | 21 | 0,492              |

a. Corrección de la significación de Lilliefors

\*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

En la tabla 3-15 se presentar los resultados de la prueba T-student donde la variable 1 corresponde a los valores de la entrada y la variable 2 a los valores de nitrato a la salida del humedal.



Tabla 3-15. Prueba de muestras relacionadas

|                                               | Diferencias relacionadas |                    |                              |                                                     |          | t       | gl | P <sub>valor</sub> |
|-----------------------------------------------|--------------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------|----------|---------|----|--------------------|
|                                               | Media                    | Desviación<br>típ. | Error típ.<br>de la<br>media | 95% Intervalo de<br>confianza para la<br>diferencia |          |         |    |                    |
|                                               |                          |                    |                              | Inferior                                            | Superior |         |    |                    |
| Entrada- Salida<br>Etapa 0 (NO <sub>3</sub> ) | 3,367                    | 1,633              | 0,356                        | 2,624                                               | 4,111    | 9,447   | 20 | 0,000              |
| Entrada- Salida<br>Etapa1 (NO <sub>3</sub> )  | 55,210                   | 1,171              | 0,255                        | 54,677                                              | 55,743   | 216,018 | 20 | 0,000              |
| Entrada- Salida<br>Etapa 2 (NO <sub>3</sub> ) | 55,335                   | 1,035              | 0,225                        | 54,864                                              | 55,807   | 244,918 | 20 | 0,000              |

#### Contraste de supuestos

$$H_0 : M_{\text{entrada}} = M_{\text{salida}} \quad (P_{\text{valor}} > \alpha)$$

$$H_1 : M_{\text{entrada}} \neq M_{\text{salida}} \quad (P_{\text{valor}} < \alpha)$$

Los resultados obtenidos en las pruebas de “T-Relacionadas” indican valores de P<sub>valor</sub> menor que el valor  $\alpha$  (0,05) en las tres etapas el estudio del humedal. Al ser el P<sub>valor</sub> menor que  $\alpha$ , se descarta la hipótesis nula, por lo tanto, el sistema de tratamiento que se está aplicando si tiene un efecto en el nivel de nitrato en el agua.

Como mecanismos de corroborar la tendencia de los valores se pueden identificar que en las tres etapas con un 95% intervalo de confianza lo niveles de NO<sub>3</sub> Entrada -NO<sub>3</sub> Salida mantienen limites inferior positivo (+) y superior (+) lo que nos indica que los valores fueron consistente, resultado que es traducido a que en promedio el NO<sub>3</sub> en la entrada es mayor que el valor de NO<sub>3</sub> en la salida del humedal.

Los valores resultantes de la salida si muestran una mejora en la remoción de NO<sub>3</sub> en el agua.

### 3.12.2 Resultados Análisis de la media de la salida del humedal en la etapa 0 y Etapa 1 (Sin metanol, Con Metanol)

Cumplíendose normalidad de los valores se procedió a correr la prueba T-Student, mostrando los siguientes resultados.

*Tabla 3-16. Estadísticos de muestras relacionadas*

|       |                    | Media   | N  | Desviación típ. | Error típ. de la media |
|-------|--------------------|---------|----|-----------------|------------------------|
| Par 1 | Salida Sin Metanol | 57,2957 | 21 | 1,96068         | 0,42785                |
|       | Salida con Metanol | 5,5943  | 21 | 0,61363         | 0,13390                |

*Tabla 3-17. Correlación de muestras relacionadas*

|       |                                        | N  | Correlación | Sig.  |
|-------|----------------------------------------|----|-------------|-------|
| Par 1 | Salida Sin Metanol- Salida con Metanol | 21 | -0,284      | 0,212 |

*Tabla 3-18. Prueba de muestras relacionadas Sin Metanol - Con metanol*

|                                                 | Diferencias relacionadas |                    |                              |                                                     |          | t       | gl | P <sub>valor</sub> |
|-------------------------------------------------|--------------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------|----------|---------|----|--------------------|
|                                                 | Media                    | Desviación<br>típ. | Error típ.<br>de la<br>media | 95% Intervalo de<br>confianza para la<br>diferencia |          |         |    |                    |
|                                                 |                          |                    |                              | Inferior                                            | Superior |         |    |                    |
| Salida Sin<br>Metanol-<br>Salida con<br>Metanol | 51,70143                 | 2,21465            | 0,48328                      | 50,69333                                            | 52,70952 | 106,981 | 20 | 0,000              |

Para esta prueba se descarta la  $H_0$  debido a que se obtuvo un  $P_{\text{valor}}$  menor a  $\alpha$  (0,05) por lo tanto, la aplicación de metanol al sistema de tratamiento si tiene un efecto en el nivel de nitrato en el agua.

La aplicación de Metanol al sistema si genera un cambio en los procesos de reducción de  $\text{NO}_3$  en el agua.

### 3.13 DISCUSIÓN COMPARATIVA DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en este estudio, que mostraron porcentajes de remoción de nitrato  $> 90\%$  para la etapa 1 y 2, son similares o superiores a los reportados en estudios presentados en la información bibliográfica de referencia consultada. Cabe destacar que los estudios encontrados en la bibliografía no corresponden específicamente a la configuración de un humedal construido de flujo vertical ascendente. Las configuraciones de flujo más frecuentemente utilizadas son los humedales de flujo subsuperficial horizontal y flujo subsuperficial vertical descendente.

En el estudio de Barrios & Córdoba (2015), en un humedal construido de flujo vertical descendente, sembrado con *Typha dominguensis Pers.*, se obtuvieron porcentajes de remoción de  $\text{N-NO}_3$  de 92 – 98% mientras que la remoción de Nitrógeno Total Kjeldahl fue del 96%. Rodríguez & Durán (2006), en un humedal artificial de flujo vertical a escala de banco reportaron una depuración de nitratos en agua residual sintética relativamente variable, con eficiencias de remoción entre 83.2% y 96.5%.

En el estudio realizado por Marín & Londoño (2009), donde se evaluaba la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales de flujo horizontal subsuperficial, con grava como medio de soporte, alimentado con agua sintética y sembrado con *Phragmites australis* y *Typha latifolia*, se determinaron porcentajes de remoción de Nitrogeno Kjeldahl (NTK) de 61, 75 y 77 % .

En el estudio denominado Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters publicado por la EPA en el año 2000, se reporta que humedales construidos con la configuración de flujo vertical pueden obtenerse porcentajes de remoción del 67% de Nitrógeno como Nitrato.

Con referencia a las especies vegetales utilizadas en los humedales construidos, los estudios realizados por Merlin, Sedilot, Herbert, & Grasselly D, (2002) en unidades experimentales para depurar soluciones de drenaje de invernaderos de tomate, con concentraciones medias de 329 mg/l de  $\text{N-NO}_3$ , plantadas *Phragmites australis*, pudieron demostrar una reducción de hasta un 70% de los nitratos. Por su parte, Headley, Huett, & Daison, (2001) reportaron que en humedales a escala piloto, usando como medio de

soporte grava basáltica y la misma especie (*Phragmites australis*) se obtuvieron remociones mayores de 84 % de Nitrogeno Total.

Como se ha mencionado previamente en este estudio no se logró determinar la tasa máxima de eliminación de nitrato, pero la comparación de los resultados obtenidos con los que nos muestra la bibliografía, nos permite concluir que este tipo de tecnología puede ser una herramienta de gran utilidad para mejorar la calidad del agua contaminada con nitrato.

A continuación se presenta un cuadro resumen de estudios de humedales construidos y los resultados obtenidos.

*Tabla 3-19. Compilación de estudios en humedales construidos y sus resultados*

| <b>Autor</b>                             | <b>Título</b>                                                                                                                                                  | <b>Descripción</b>                                                                                                                                                                       | <b>Resultados<br/>(%Remoción)</b>                                |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Maine et al., (2014)                     | Wetlands construidos para tratamiento de efluentes de industrias metalúrgicas                                                                                  | Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral, Santiago del Estero, Santa Fe, Argentina.                                                                              | 80,4% de remoción (NO <sub>3</sub> )                             |
| Barrios & Córdoba, (2000)                | Evaluación de un Humedal Artificial para la Remoción de Nitrógeno de un Agua Residual de Origen Sintético                                                      | Departamento de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela. Humedal de Flujo vertical descendente sembrada con <i>Typha dominguensis</i> . | 98%; 92% de N-NO <sub>3</sub> y 96% de Nitrógeno Total Kjeldahl. |
| M. Romero, Colín, Sánchez, & Ortiz, n.d. | Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. (Humedal de Flujo Horizontal) | Centro de Investigación en Biotecnología, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, Morelos, México.                                                                       | 45.46 % (NO <sub>3</sub> )                                       |
| EPA (2000)                               | Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. EPA/625/R-99/010.                                                                                     | USEPA Office of Research and Development, Cincinnati, OH.                                                                                                                                | 67% N-NO <sub>3</sub>                                            |

| <b>Autor</b>                            | <b>Título</b>                                                                                                                                                     | <b>Descripción</b>                                                                                                                                                       | <b>Resultados<br/>(%Remoción)</b>          |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Rodriguez & Durán, (2006)               | Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco.                         | Facultad de Química, UNAM. México. Humedal de flujo vertical descendente sembrado con <i>Typha latifolia</i> y <i>Phragmites australis</i> .                             | 83.2 al 96.5% NO <sub>3</sub> .            |
| Marín & Londoño, (2009)                 | Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética. | Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnología. Humedal de flujo horizontal subsuperficial sembrado con <i>Phragmites australis</i> y <i>Typha latifolia</i> | 61-77% (Nitrogeno NTK)                     |
| Salas, Pidre, & Sánchez, (2007)         | Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales.                                                                                   | Instituto del Agua de Andalucía. Sevilla.                                                                                                                                | 60 – 70 % Nitrógeno total. (H.A. Vertical) |
| Hadad, Mufarrije, Luca, & Maine, (2014) | Influencia del pH y salinidad de un efluente industrial sobre la dominancia de macrófitas flotantes y emergentes en un wetland construido                         | Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral, Santiago del Estero Argentina.                                                                         | 61-77% (Nitrogeno NTK)                     |
| Headley, Huett, & Daison, (2001)        | The removal of nutrients from plant nursery irrigation runoff in subsurface horizontal-flow wetlands.                                                             | Humedales a escala piloto usando como medio de soporte grava basáltica y la especie <i>Phragmites australis</i>                                                          | 84% NT.                                    |

### **3.14 VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL SISTEMA DE HUMEDAL CONSTRUIDOS DE FLUJO VERTICAL ASCENDENTE.**

#### **Ventaja:**

- Técnica sencilla y de bajo costo de inversión en comparación con tecnologías de tratamiento convencionales.
- La configuración de flujo subsuperficial evita la emanación de olores desagradables porque la superficie del agua no se encuentra en contacto con la atmósfera.
- La configuración de flujo subsuperficial previene la proliferación de vectores (mosquitos) porque no hay espejo de agua expuesto para la oviposición. Esta ventaja y la anterior son especialmente relevantes en zonas cálidas y húmedas (tropicales y subtropicales).
- La configuración del humedal con falso fondo y flujo vertical ascendente, permite suponer que el flujo se distribuye de forma uniforme evitando los cortocircuitos o flujos preferenciales.
- La configuración de sistema permite soportar variaciones de caudal.
- Los costos de mantenimiento y operación son mínimos ya que el gasto energético es nulo o muy bajo, dependiendo de la topografía.
- Constituye un sistema versátil y altamente flexible para adaptarse a distintos tipos de aguas residuales, así como a amplias variaciones de concentraciones y caudal.

#### **Limitaciones**

- Los componentes biológicos tienen requerimientos específicos y se deben mantener las condiciones adecuadas para un buen funcionamiento. Para el proceso de desnitrificación, la ausencia de oxígeno disuelto y una fuente de carbono adecuada y suficiente, los que deben ser monitoreados en forma permanente.
- El rendimiento del sistema puede ser menos constante que el de un proceso convencional, dependiendo de variables ambientales como la temperatura.
- Puede ser susceptible de obstrucciones debido a acumulación de sedimentos si no se garantiza un tratamiento primario eficiente que elimine los sólidos.

El uso de humedales construidos de flujo vertical ascendente ha sido poco experimentado y no se cuenta con suficiente información bibliográfica sobre el rendimiento a largo plazo.

### **3.15 FACTIBILIDAD DE APLICACIÓN EN EL CAMPO DE LA ECOHIDROLOGIA**

Los excedentes de nitrógeno orgánico provenientes por lixiviación de residuos sólidos (basurales) y por aportes de aguas residuales, y sus derivados inorgánicos por degradación biológica (amonio, nitritos y nitratos), constituyen uno de los contaminantes más importantes que reciben los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, creando problemas de riesgos de toxicidad para los organismos acuáticos y para el ser humano que utiliza esos recursos para consumo, además de provocar cambios ambientales en los cuerpo receptores.

La utilización de humedales construidos de flujo vertical ascendente puede contribuir a la preservación y/o recuperación del estado ecológico de los ecosistemas hídricos que actualmente reciben descargas con altas concentraciones de materia orgánica.

Los humedales construidos se comenzaron a utilizar para eliminar sólidos suspendidos y carga orgánica (tratamiento primario y secundario) de caudales pequeños de aguas residuales en reemplazo de las tecnologías convencionales. Intercalando un humedal de flujo subsuperficial entre la fuente emisora de aguas residuales y el curso receptor se puede eliminar el 90% de la carga contaminante total.

Con referencia al objetivo concreto de este trabajo, un humedal similar al descripto y experimentado, llevado a escala, se podría utilizar como tratamiento terciario de efluentes de estaciones depuradoras de sistemas centralizados que frecuentemente son diseñados para la remoción de sólidos, DBO y DQO (tratamiento secundario) pero que no cuentan con una etapa de eliminación de nutrientes (tratamiento terciario). De igual forma puede ser aplicado a aguas residuales domésticas y de producción de alimentos (Lecheras, queseras).

En Particular la gestión del agua en América Latina y el Caribe enfrenta una crisis debido a la superación de cuatro desafíos que comienzan a ocupar un lugar cada vez más preponderante en la agenda de los tomadores de decisiones en cualquier campo de

actividades. Uno de estos desafíos se relaciona específicamente de remediar la contaminación del agua, en gran parte debido a la carencia o insuficiencia de sistemas de tratamiento de los subproductos derivados de su uso, así como la disposición de los recursos económicos-financieros para su construcción. Con base en el conocimiento que se tiene de la aplicación de estos sistemas de humedales construidos la recuperación del agua y el mejoramiento ambiental serán más prometedores.

La aplicación de este tipo de sistemas denominados no convencionales los cuales entre sus ventajas es poder ser aplicados bajo condiciones de bajo costo de construcción y mantenimiento

Asimismo, dada la enorme variedad de aguas residuales, es ahora probable la aplicación de procesos respiratorios combinados para la eliminación de nitrógeno, con base en el conocimiento que se tiene de la fisiología de la respiración nitrogenada. Si se aplican diseños tecnológicos concebidos en esta información, la recuperación del agua y el mejoramiento ambiental serán más prometedores.



## 4 CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos demostraron que los humedales construidos de flujo vertical ascendente constituyen una herramienta adecuada y eficiente para la remoción de nitratos ( $\text{NO}_3$ ) en el agua.
- Considerando las concentraciones de nitratos y los caudales utilizados en cada etapa, se midieron tasas de consumo de 0,34, 8,7 y 14,3 g  $\text{NO}_3/\text{d}$
- Con los valores de consumo mencionados se pudieron calcular las siguientes tasas de remoción volumétrica. Durante la etapa 0: 3,3 g  $\text{NO}_3/\text{m}^3.\text{d}$ , durante la etapa 1: 85,7 g  $\text{NO}_3/\text{m}^3.\text{d}$  y durante la etapa 2: 140,6 g  $\text{NO}_3/\text{m}^3.\text{d}$ . Las eficiencias porcentuales de remoción fueron de 6%, 91% y 92% respectivamente.
- Para relacionar las tasas de remoción de cada etapa con el potencial de un humedal vertical de flujo ascendente se puede expresar la remoción como:

Remoción por metro cuadrado de humedal: 0,57, 14,8 y 24,3 g  $\text{NO}_3/\text{m}^2.\text{d}$ , en cada etapa respectivamente.

Remoción por metro cúbico de humedal: 0,96, 24,7 y 40,5 g  $\text{NO}_3/\text{m}^3.\text{d}$ , en cada etapa respectivamente.

- En la etapa 2 se aplicó un incremento del 63% del caudal lo que significó un incremento del 62% de la carga de nitratos y una reducción del 39% del tiempo de residencia hidráulica. Aun así el humedal incrementó la tasa de remoción de 91 a 92%, removiendo más del doble de  $\text{NO}_3$  que en la etapa anterior.
- Estos resultados no permiten establecer la tasa máxima de remoción pero es evidente que la carga se puede incrementar todavía mucho más.
- El agregado de una fuente de carbono fácilmente asimilable durante las etapas 1 y 2 incrementó notablemente la eficiencia de remoción lo que demuestra que esa variable es una de las que gobierna el proceso.
- El humedal no disponía de una reserva interna de carbono para estimular la desnitrificación porque se trataba de un modelo recién armado e inmaduro. Es

esperable que un humedal bien establecido, tenga en la zona radicular restos y exudados vegetales suficientes para cumplir esa función.

- Respecto a la temperatura los promedios obtenidos durante las pruebas experimentales fueron entre 24 °C y 25 °C. Durante el mes de receso académico (diciembre) la temperatura se vio incrementada debido a que el aire acondicionado central del laboratorio no se encontraba en funcionamiento.
- Durante las pruebas experimentales el promedio de la conductividad eléctrica en la entrada y la salida fueron 226,61 y 209,32 uS/cm, respectivamente. Este parámetro reflejó una leve disminución a la salida del sistema.
- Los valores de pH y de Potencial Redox (ORP) mostraron un leve descenso en la etapa 2, en que la actividad microbiana desnitrificante fue muy importante. Se supone que ese descenso estuvo controlado o limitado por la reserva buffer de fosfatos incluida en el agua de alimentación, pero indica que es un aspecto que debe ser considerado.
- En cuanto al parámetro DQO, se observó su incremento a partir de la etapa 1 en la que se adicionó al sistema una fuente externa de carbono (metanol), el cual permitió mejorar el proceso de saneamiento del agua para el parámetro de Nitrato.
- Los resultados obtenidos en esta investigación muestran concentraciones bajas de fosfato, debido a que el único aporte de este nutriente en el agua preparada era el difosfato de potasio ( $K_2HPO_4$ ) que se usó como agente de taponamiento del pH. En contraste, el fosfato estuvo generalmente en niveles más bajos en la entrada que en la salida del humedal. Las consideraciones que podemos aportar con referencia a esta diferencia se debe a que las raíces de las plantas pueden liberar en el sistema concentraciones de fósforo a través del proceso de muerte y degradación de las raíces.
- Con el estudio bromatológico realizado a las raíces de la plantas usadas en el humedal se logró cuantificar ciertos elementos y compuestos tales como porcentaje de materia orgánica la cual fue de un 83,6% Nitrógeno con 0,89%, hierro 2,48%, Calcio 1,56% y fósforo de 503 mg/kg.

- La aplicación y análisis de las pruebas T-Student para muestras relacionadas (Entrada-Salida) a la base de datos recopilada, permitió establecer que efectivamente hubo una diferencia estadísticamente significativa en estos registros. Los resultados nos indican que en promedio el  $\text{NO}_3$  en la entrada es mayor que el valor de  $\text{NO}_3$  en la salida del humedal.
- Los resultados obtenidos nos permiten determinar que la aplicación de un sistema de humedal vertical ascendente, con una buena fuente de carbono y el control constante de variables como el oxígeno disuelto (por debajo de  $2\text{mg/l}$ ) y el pH (entre 6 y 8), pueden ser aplicados al tratamiento de efluentes con cargas contaminantes de nutrientes como el nitrato ya que cuentan con un buen potencial para su remoción.

## **5 RECOMENDACIONES**

- Para el diseño del modelo experimental de humedal de flujo ascendente se asumió que es un reactor de flujo pistón y que sigue una cinética de primer orden. Sería interesante enfocar en una investigación próxima, el estudio hidrodinámico del sistema que analice la cinética de la dispersión del flujo dentro del sistema.
- Otro tema que se recomienda enfocar en un próximo estudio, sería determinar el comportamiento microbiológico del sistema y el estudio de las bacterias que permiten el saneamiento dentro del sistema.
- Por lo ajustado del cronograma de esta investigación no se logró someter el sistema a un TRH menor de 9 horas, se recomienda realizar pruebas previas con menores THR y verificar si existe mayor diferencia de los resultados de tasa de remoción obtenidos en esta evaluación.

## **6 RECONOCIMIENTOS**

Se agradece el apoyo de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) por el apoyo de la beca de Maestría y a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de Panamá por el espacio brindado en los laboratorios de Hidráulica y Sanitaria para el desarrollo de la investigación.

## 7 BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Abdirashid, E., Madramootoo, C., Egeh, M., Liu, A., & Hamel, C. (2002). Environmental and agronomic implications of water table and nitrogen fertilization management. *Journal of Environmental, Quality* 31, 1858–1867.
- Arcos, R., Cantellano E, Alejo M, G. R., & La, S. R. (1999). R. de. (1999). *Remoción de la materia orgánica mediante la utilización de humedales artificiales en la comunidad de Sta. María nativitas Texcoco edo. Facultad de estudios superiores*. 8 p. (p. 8). Mexico.
- Arias, C. A., & Brix, H. (2003). Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas residuales, 17–24. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91101302#>
- Autoridad del Canal de Panamá. (2006). *Informe de Calidad de agua Cuenca del Canal de Panamá 2003-2009*.
- Autoridad Nacional del Ambiente. (2014). *Informe de Monitoreo de la Calidad del agua en las cuencas Hidrográficas de Panamá*.
- Bahlo, K. ., Wach, F. G., & Cooper, 1999. (1990). Purification of domestic sewage with and without faeces by vertical intermittent filtration in reed and rush beds. In: Cooper, P.F., Findlater, B.C. (Ed.), *Constructed Wetlands in Water Pollution Control. Proceedings of International Conference Cambridge, UK, Advances in Water Pollution Control*, Pergamon Press, Oxford, UK, 215–222.
- Barrios, E., & Córdoba, Y. (2000). Evaluación de un Humedal Artificial para la Remoción de Nitrógeno de un Agua Residual de Origen Sintético. *Tribunal Del Investigador*, 7 No.2, 37–44.
- Brix, H., & Arias, C. a. (2005). Danish guidelines for small-scale constructed wetland systems for onsite treatment of domestic sewage. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 51, 1–9. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16042237>
- Calvo, M. S. (1999). *Aguas Residuales: Tratamiento por Humedales Artificiales. Fundamentos científicos. Tecnologías. Diseño* (Ediciones ). Madrid.
- Cervantes, F., Pérez, J., & Gómez, J. (2000). Avances en la eliminación biológica del nitrógeno de las aguas residuales. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 42, 73–82.
- Chambon, P., Lund, U., Gala-Gorchev, H., & Ohanian. (1998). Health Criteria and Other Supporting Information - Addendum (No. WHO/EOS/98.1). Geneva, Switzerland: World Health Organization. *WHO Guidelines for Drinking-Water Quality: Volume 2*.
- Crites, R. W., & Tchobanoglous, G. (1998). *Small and Decentralized Wastewater Management Systems* (McGraw Hil). New York, NY.
- De Gracia, M. (2011). *Guía para el analisis Bromatológico de Muestras de forraje* (Facultad d). Panamá.

- Deago, E. (2014). *Desnitrificación biológica usando sustratos sólidos orgánicos naturales como donante de electrones y fuente de carbono*. Tesis Doctoral, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Delgadillo, O., Camacho, A., & Serie, M. A. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales* (p. 115).
- DGNTI. Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 23-395-99. AGUA. Agua Potable. Definiciones y Requisitos Generales. (1999).
- Dierberg, F. E., & DeBusk, T. A. (2005). An evaluation of two tracers in surface-flow wetlands: Rhodamine-WT and Lithium. *Wetlands* 25, No 1, 8–25.
- Ecocell-proyectos e consultoria ambiental. (2014). *Informe Final Humedal para CCS (Consejo Científico Social)* (pp. 5–10). Valdivia, Chile.
- EPA-832-F-00-023. (2000). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial*. United States Environmental Protection Agency (p. 13).
- García, J., & Corzo, A. (2008). *Depuración con humedales construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial*.
- Gerber, W. (2014). *Uso de la Tecnología de Humedales Construidos*.
- Hadad, H. R., Mufarregge, M. M., Luca, G. A. Di, & Maine, M. A. (2014). Influencia del pH y salinidad de un efluente industrial sobre la dominancia de macrófitas flotantes y emergentes en un wetland construido. *Memorias de La Segunda Conferencia Panamericana En Sistemas de Humedales Para El Manejo, Tratamiento Y Mejoramiento de La Calidad Del Agua.*, 139–145.
- Halling-Sorensen, & Jorensen, S. E. (1993). Process chemistry and biochemistry of nitrification. The removal of nitrogen compounds from waste-water, Elsevier, ed., Amsterdam, The Netherlands. *Studies in Environmental Science* 54.
- Headley, T. R., Huett, D. O., & Daison, L. (2001). The removal of nutrients from plant nursery irrigation runoff in subsurface horizontal-flow wetlands. *Water Science and Technology*, 44 (11/12), 77–84.
- Helmer-Madhok, Schmid, M., Filipov, E., Gaul, T., Hippen, A., Rosenwinkel, K. H., ... Kunst, S. (2002). Deammonification in biofilm systems: population structure and function. *Water Science and Technology*, 46 (1-2), 223–231.
- Jenkins, G. A., & Greenway, M. (2005). The hydraulic efficiency of fringing versus banded vegetation in constructed wetlands. *Ecological Engineering* 25, 61–72.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands* (Second Edi). Boca Raton, Florida.
- Kapoor, A., & Viraraghavan, T. (1997). Nitrate removal from drinking water - Review. *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 123 (4), 371-380.
- Knight, R., & Kadlec, R. H. (1996). Free water surface wetlands for wastewater treatment: A technology assessment. *CH2M Hill, Gainesville, Florida*. Retrieved from

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Free+water+surface+Wetlands+for+waste+water+treatment+a+technology+assessment#4>

- Lara, J. A. (1999). *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona España.
- Maine, M. A., Sánchez, G. C., Hadad, H. R., Caffaratti, S. E., Pedro, M. C., Di Luca, G. A., & Mufarrege, M. M. (2014). Wetlands construidos para tratamiento de efluentes de industrias metalúrgicas. *Memorias de La Segunda Conferencia Panamericana En Sistemas de Humedales Para El Manejo, Tratamiento Y Mejoramiento de La Calidad Del Agua.*, 59–61.
- Manassaram, D. M., Backer, L. C., Messing, R., Fleming, L. E., Luke, B., & Monteilh, C. P. (2010). Nitrates in drinking water and methemoglobin levels in pregnancy: a longitudinal study. *Environmental Health*, 9.
- Marín, C., & Londoño, L. (2009). *Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Marín Montoya, J., & Correa Ramírez, J. (2010). *Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando La Guadua angustifolia Kunth*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Mariñelarena, A. (2008). Los Humedales Pampeanos como Herramientas para Preservar las Lagunas. *Biología Acuática*, 24, 117–122. <http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Mariñelarena, A. (2010). Curso / Taller “ Naturaleza Y Tratamiento in Situ De Aguas Residuales a Pequeña Escala ,” 1–17.
- Mateju, V. ., Cizinska, S. ., Krejci, J. ., & Janoch, T. (1992). Biological Water Denitrification - a Review. *Enzyme and Microbial. Technology*, 14(3), 170-183.
- Mena, J., Rodríguez, L., & Núñez, J. F. (2008). Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos. Madrid, España: .
- Merlin, G., Sedilot, C., Herbert, N., & Grasselly D. (2002). Treatment of tomato greenhouses drainage solutions by experimental constructed wetland Systems for Water Pollution Control. In *Proceedings of the 8th International Conference on Wetlands Systems for Water Pollution Control, University of Dar-es-Salaam, Tanzania and IWA* (pp. 526–533).
- Ongley, E. D. (1997). Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos. (Estudio FAO Riego y Drenaje - 55). from. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/W2598S/w2598s00.htm#Contents>
- Otálora, A. P. (2011). Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de caño gandúl, 163.
- Paredes, D., & Kusch, P. (2001). Tipo de humedales y mecanismos de remoción. In *Seminario humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales*. (pp. 10–12). Pereira.



- Perez, A., & Torres, P. (2008). *Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo*. (pp. 27– 40).
- Persson, J., Somes, G. N. L., & Wong, H. F. T. (1999). Hydraulic efficiency of constructed wetlands and ponds. *Water Science and Technology*, 40 (3), 291–300.
- Pidre, J. (2010). *Influencia del Tipo y Granulometría del Sustrato en la Depuración de las Aguas Residuales Por el Sistema de Humedales Artificiales de Flujo Vertical y Horizontal*. Departamento de Tecnologías del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz.
- Ramsar Regional Center for Training and Research in the Western Hemisphere. (2009). *Inventario preliminar de los humedales continentales y costeros de Panamá* (p. 255).
- Rittmann, B., & McCarty, P. (2001). *Biología del Medio Ambiente Principios y Aplicaciones* (McGraw-Hill).
- Rivett, M. O., Buss, S. R., Morgan, P., Smith, J. W. N., & Bemment, C. D. (2008). Nitrate attenuation in groundwater: A review of biogeochemical controlling processes. *Water Research*, 42(16), 4215–4232.
- Rodríguez, J., & Durán, C. (2006). Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. *Tecnología Ciencia Ed. (IMIQ)*.
- Romero, J. (1999). *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principio de Diseño*. (Escuela Co). Colombia.
- Romero, J. (2002). *Calidad del agua* (Primera Ed). Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de ingeniería.
- Romero, M., Colín, A., Sánchez, E., & Ortiz, M. L. (n.d.). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. (Humedal de Flujo Horizontal, ).
- Saavedra, L. J. (2013). *Modelación hidráulica y de calidad de agua acoplada para humedales, mediante Processing Modflow*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Salas, J., Pidre, J., & Sánchez, L. (2007). *Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales*. Andalucía, Sevilla.
- Shrimali, M. ., & Singh, K. P. (2001). New methods of nitrate removal from water. *Environmental Pollution*, 112(3), 351-359.
- Silva, H. (2015). Evaluación de Línea Base Gestión de Aguas Residuales Panamá. *Caribbean Regional Fund for Wastewater Management*.
- Stanley, H. M. (Instituto S. de I. T. (1999). *La Cuenca del Canal: deforestación, urbanización y Contaminación*.

- Stearman, G. (2003). Pesticide removal from container nursery runoff in constructed wetland cells. *Journal of Environmental Quality*, No. 32, 1548-1556.
- USAID/CBC. (2008). *Diagnostico Técnico de la Sub-Cuenca del Rio Chagres-Lago Alajuela*.
- USEPA. (2006). Consumer Factsheet on: NITRATE/NITRITE. from. Retrieved from [Http://www.epa.gov/safewater/dwh/c-ioc/nitrates.html](http://www.epa.gov/safewater/dwh/c-ioc/nitrates.html), USEPA. (2006).
- Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P., Green, M., & Haberl, R. (1998). Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. *The Netherlands: Backhuys Publishers*.
- Yocum, D. (2006). Manual de Diseño : Humedal Construido para el Tratamiento de las Aguas Grises por Biofiltración. *Universidad De California*, 1–16.

## 8 ANEXO

UNIVERSIDAD DE PANAMA  
 FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
 LABORATORIOS DE SUELOS Y NUTRICION

FECHA: 15 de junio de 2016  
 ATENCION: María Del Rosario Nuñez  
 MUESTRA: Typha Angustifolia

REFERENCIA N°: LNP-02-15



| PARÁMETRO               | UNIDAD EXPRESADA | COMO OFRECIDO | BASE SECA |
|-------------------------|------------------|---------------|-----------|
| MATERIA SECA            | %                | 16.63         | 100.00    |
| MATERIA ORGÁNICA        | %                | 13.90         | 83.6      |
| CENIZA                  | %                | 2.73          | 16.9      |
| FIBRA CRUDA             | %                | 5.05          | 30.38     |
| EXTRACTO ETÉREO (Grasa) | %                | 0.09          | 0.57      |
| EXTRACTO NO NITROGENADO | %                | 7.76          | 46.62     |
| PROTEÍNA (N x 6.25)     | %                | 1.00          | 6.03      |
| HUMEDAD                 | %                | 83.37         | 0         |
| CALCIO                  | %                | 0.26          | 1.56      |
| MAGNESIO                | %                | 0.10          | 0.57      |
| FÓSFORO                 | mg/Kg            | 84            | 503       |
| POTASIO                 | %                | 0.14          | 0.87      |
| SODIO                   | %                | 0.15          | 0.91      |
| HIERRO                  | %                | 0.41          | 2.48      |
| COBRE                   | mg/Kg            | 2             | 15        |
| MANGANESO               | mg/Kg            | 34            | 202       |
| ZINC                    | mg/Kg            | 7             | 42        |

*Berta Carrera*  
 QUIMICO  
 CED. 4-148-901  
 REGISTRO N° 402 IDONEIDAD N° 0792  
*Berta Lidia Carrera L*  
 Lic. Berta Lidia Carrera L  
 Analista - Laboratorio de Análisis

*Francisco A. Mora S.*  
 Dr. Francisco A. Mora S.  
 Prof. Departamento de Suelos y Aguas